



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL
ESCUELA DE POSGRADOS "ESPOG"

MAESTRÍA EN
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
*Resolución: **RPC-SO-09-No.265-2021***

PROYECTO DE TITULACIÓN EN OPCIÓN AL GRADO DE MAGÍSTER

Título del proyecto:
Sistema experto para supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa
Línea de Investigación:
Ciencias de la Ingeniería aplicadas a la producción, sociedad y desarrollo sustentable
Campo amplio de conocimiento:
Ingeniería e Industria
Autor/a:
Ing. Jácome Espín Paúl Marcelo
Tutor/a:
MSc. René Ceferino Cortijo Jacomino

Quito – Ecuador
2022

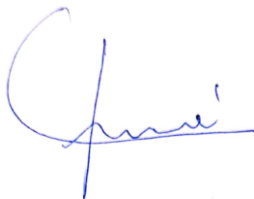
APROBACIÓN DEL TUTOR



Yo, Mg. **René Ernesto Cortijo Leyva** con C.I: **1719010108**, en mi calidad de Tutor del proyecto de investigación titulado: **“Sistema experto para supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa”**.

Elaborado por: **Paúl Marcelo Jácome Espín**, de C.I: **0502924756**, estudiante de la Maestría: **Electrónica y Automatización**, de la **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL (UISRAEL)**, como parte de los requisitos sustanciales con fines de obtener el Título de Magister, me permito declarar que luego de haber orientado, analizado y revisado el trabajo de titulación, lo apruebo en todas sus partes.

Quito 15 de septiembre del 2022



Firma

Tabla de contenidos

APROBACIÓN DEL TUTOR	2
DECLARACIÓN DE AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL ESTUDIANTE	3
INFORMACIÓN GENERAL	1
Contextualización del tema	1
Problema de investigación	2
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
Vinculación con la sociedad y beneficiarios directos:	3
CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	4
1.1. Contextualización general del estado del arte	4
1.2. Proceso investigativo metodológico	8
CAPÍTULO II: PROPUESTA	10
2.1 Fundamentos teóricos aplicados	10
Sistemas expertos	10
Base del conocimiento	11
Máquina de inferencia	11
Interfaz de usuario	12
Lógica difusa	12
Conjuntos difusos	12
Funciones de membresía	13
Función de pertenencia triangular	13
Función de pertenencia trapezoidal	13
Sistema de control difuso	14
La fuzzificación	14
Mecanismo de inferencia	14
La defuzzificación	15
Computación en la nube	15
2.2 Descripción de la propuesta	16
Estructura general	16
Explicación del aporte Estrategias y/o técnicas	18
Adquisición de datos	18
Programación de Raspberry Pi	18
Almacenamiento y pre visualización de datos en la nube	21

Desarrollo del sistema experto	22
Variables lingüísticas:	22
Base de reglas:	24
Fuzzificar:	25
Defuzzificar:	26
Procesamiento de datos en Simulink	27
Estrategias y/o técnicas	28
Validación de la propuesta	29
2.3 Matriz de articulación de la propuesta	32
2.4 Análisis de resultados. Presentación y discusión.	33
Validación con expertos	36
CONCLUSIONES	36
RECOMENDACIONES	38
BIBLIOGRAFÍA	39
ANEXOS	42

Índice de tablas

Tabla 1 Base de reglas difusa	24
Tabla 2 Descripción de perfil de validadores	29
Tabla 3 Evaluación de criterios de cuatro especialistas	30
Tabla 4 Matriz de articulación.....	32
Tabla 5 Datos de falla.....	35

Índice de figuras

Figura 1 Arquitectura de un sistema experto	11
Figura 2 Función de pertenencia triangular.....	13
Figura 3 Función de pertenencia trapezoidal	14
Figura 4 Sistema de control difuso.....	15
Figura 5 Esquema del sistema monitoreo remoto.....	16
Figura 6 Circuito obtención de datos	17
Figura 7 Diagrama de flujo del sistema de monitoreo remoto.....	17
Figura 8 Circuito de adquisición de datos	18
Figura 9 Inicialización de Node RED	19
Figura 10 Configuración de la librería ADS1x15_i2c	20
Figura 11 Configuración de la librería ThingspeakSendSimple	20
Figura 12 Plataforma ThingSpeak	21
Figura 13 Credenciales de identificación del canal en ThingSpeak.....	22
Figura 14 Configuración de los conjuntos difusos en Matlab	24
Figura 15 Base de reglas difusas en Matlab.....	25
Figura 16 Fuzzificación en la herramienta de Matlab	26
Figura 17 Defuzzificación con Matlab	26
Figura 18 Programa en Simulink	27
Figura 19 Programa completo desarrollado en Simulink.....	28
Figura 20 Prototipo Armado.	33
Figura 21 Comprobación de comunicación entre Raspberry Pi y ThingSpeak.....	34
Figura 22 Pantalla de monitoreo remoto en Simulink.....	35
Figura 23 Falla grave del oleoducto	36

INFORMACIÓN GENERAL

Contextualización del tema

El presente proyecto cuenta con un diseño que se basa en las experiencias de operarios en una planta dedicada al bombeo de hidrocarburos, las experiencias dentro del campo profesional mencionado nos brindan un punto de vista objetivo para el desarrollo de un sistema experto que aporte en el monitoreo y toma oportuna de decisiones ante la presencia de eventuales fallas que puedan presentarse en el oleoducto dedicado a transportar crudo; o también ante eventuales errores que se den en las válvulas de seguridad las cuales están ubicadas a lo largo del oleoducto. Para este propósito se usará un control basado en lógica difusa combinado con la herramienta conocida como “máquinas de estados” modelada en *Simulink* de *Matlab*.

Un segundo aspecto del enfoque es el contar con una orientación al internet de las cosas, aplicado en el momento de la captura de datos provenientes de transmisores de presión ubicados en las válvulas de seguridad, este proceso se realiza con una *Raspberry Pi* y su posterior envío a la nube mediante el protocolo *MQTT*; cuando estos datos se encuentran en la nube se procede a capturarlos en la estación de transferencia de hidrocarburos, el siguiente paso es el procesarlos en tiempo real por medio de un sistema experto.

En el campo de la industria petrolera se cuenta con cientos de kilómetros de tubería de variado diámetro que es empleada para el transporte de los diferentes tipos de fluidos, esta tubería tiene el nombre de oleoducto. Se definen puntos estratégicos del oleoducto en base a criterios de distancia y de estado crítico del sistema para la instalación de válvulas dedicadas al control y válvulas dedicadas a la seguridad, mencionadas válvulas actúan según las condiciones existentes en determinado tramo de tubería. El oleoducto circula por un espacio de camino llamado “derecho de vía” el cual es exclusivo para la tubería y debe cumplir ciertos parámetros: debe encontrarse siempre limpio de maleza y contar con una superficie variable dependiendo del diámetro de la tubería. En la ciudad de Shushufindi se encuentra instalada una estación de transferencia, su función es mantener condiciones operativas favorables, esta estación cuenta con dos operadores los cuales trabajan turnos de doce horas, adicional existe un supervisor y un técnico mismos que son encargados de movilizarse a detectar cualquier inconveniente en caso de presentarse alguna contingencia en algún tramo del oleoducto.

En la industria hidrocarburífera mundial y en este caso en la de nuestro país es de vital importancia el constante monitoreo del oleoducto y las válvulas de seguridad que las

componen, dado que este factor es determinante en el tiempo de reacción en el momento que se produce alguna falla, cada deficiencia en el sistema de traslado del crudo ocasiona millones de pérdidas para las empresas que se dedican a la extracción y transporte de petróleo, esto sin contar con el impacto medio ambiental resultante de roturas o taponamientos en el oleoducto. Al tener cientos de kilómetros de tubería la complejidad de su revisión y monitoreo es alta para un operador o *Pumpman* pueda revisar físicamente toda la trayectoria del oleoducto y verificar manualmente las óptimas condiciones de las válvulas de seguridad según datos de Petroecuador (2019) el oleoducto transecuatoriano cuenta con un total de 497,7 kilómetros de extensión atravesando costa, sierra y oriente contando con 6 estaciones de bombeo y 4 reductoras de presión.

Problema de investigación

Actualmente, la estación de transferencia de hidrocarburos situada en la ciudad de Shushufindi transporta crudo por medio de un oleoducto de 16 pulgadas que cruza el oriente ecuatoriano hasta la estación de Petroecuador ubicada en Lago Agrio para empatare al oleoducto de crudo pesado del Ecuador o más conocido como OCP, en todo este trayecto del oleoducto se encuentran instaladas cuatro válvulas de seguridad ubicadas a diferentes distancias.

El problema radica justamente ahí, en la distancia que se encuentra de la estación de transferencia hacia cada una de las válvulas de seguridad cerrándose cuando se presenta una condición anormal generalmente la presión es muy elevada o es muy baja en un tramo de tubería el tiempo de respuesta es muy grande, la presión es el parámetro más importante en el oleoducto y esta toma tiempo en presurizarse o despresurizarse. Poder detectar esa desviación en la planta de transferencia es el primer paso para resolver el fallo o contingencia, pero una vez descubierta la desviación los operarios de la planta deben dividirse para ir a cada válvula e identificar cual está cerrada para posteriormente analizar y visualizar la falla existente ya sea en el tramo de tubería o en la válvula de seguridad, después de todo ese tiempo invertido se procede a tomar una acción que en la mayoría de los casos es correctiva.

De continuar con este procedimiento podría en algún momento presentarse una rotura importante del oleoducto lo que podría ocasionar una catástrofe a nivel medio ambiental que perjudica a la flora y fauna que rodea el oleoducto produciendo grandes pérdidas económicas para la empresa.

Por estas razones es imprescindible el monitoreo y control de los cinco tramos del oleoducto y de las 4 válvulas de seguridad instaladas por medio de un sistema experto para la

toma ágil de decisiones con lo que lograremos identificar claramente cuál válvula o tramo de tubería tienen algún problema reduciendo al mínimo el tiempo de reacción ante cualquier contingencia.

Objetivo general

Desarrollar un sistema experto para la supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa.

Objetivos específicos

Determinar los algoritmos, herramientas y condiciones de expertos para generar la lógica difusa.

Diseñar el circuito electrónico de adquisición y transmisión de datos basado en *Raspberry Pi*.

Crear el dashboard de monitoreo de datos en *ThingSpeak*.

Validar mediante simulación del sistema basado en lógica difusa y máquina de estados en *Simulink* de *Matlab*.

Vinculación con la sociedad y beneficiarios directos:

El aporte social más importante que se obtiene tras el desarrollo del presente proyecto es la preservación del medio ambiente, puesto que al tener una alerta temprana para una eventualidad en el oleoducto minimizamos los daños al medio ambiente al identificar con exactitud el cierre de una válvula de seguridad disminuyendo así el tiempo de respuesta para trabajos correctivos en un tramo específico del oleoducto, por tanto los beneficiarios indirectos en el presente proyecto son los habitantes de las poblaciones cercanas a la trayectoria del oleoducto, podemos indicar que son los moradores del cantón Shushufindi.

Con la generación de históricos de los datos obtenidos de los transmisores de presión se puede crear un historial lo cual beneficiara a la estación de transferencia situada en Shushufindi puesto que con el estudio de estos datos podemos reducir tiempos de respuesta tras presentarse algún inconveniente en el oleoducto o en las válvulas de seguridad, con tiempos más cortos de respuesta se minimiza las pérdidas económicas, el peor escenario es no entregar crudo al estado ecuatoriano por un lapso de un día lo que representaría 14000 barriles de crudo no vendido, con lo cual los beneficiarios directos del proyecto es la empresa petrolera que implementará la solución propuesta en este documento.

CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1. Contextualización general del estado del arte

La estación de bombeo ubicada en la ciudad de Shushufindi es el eje principal para el transporte de petróleo desde el bloque 16 hasta el OCP (Oleoducto de crudo pesado), perteneciente a la empresa estatal Petroecuador, la estación de bombeo y Petroecuador están unidos por un oleoducto de 16 y 24 pulgadas de diámetro, el mismo tienen una longitud de 67 kilómetros.

A lo largo del oleoducto se encuentran ubicadas estratégicamente 4 válvulas de seguridad que tienen por nombre, válvula 4x4, válvula del río aguarico, válvula del pozo 27 y por último la válvula del OCP, todas estas válvula de seguridad se accionan al presentarse una variación significativa en la presión del oleoducto ocasionando una presurización o despresurización del mismo, al no tener los operadores señales de monitoreo en la estación de bombeo de Shushufindi de estas válvulas de seguridad el tiempo de respuesta ante cualquier eventualidad que ocurriera en cualquier punto del oleoducto es muy elevado puesto que las únicas señales de monitoreo están ubicadas en el oleoducto a la salida de la estación.

Una vez detectado visualmente por el operador una variación significativa en la presión del oleoducto a la salida de la estación Shushufindi, 4 operarios de la planta se dirigen a cada una de las válvulas de seguridad para identificar el sitio exacto en el cual se acciona la válvula y posteriormente identificar por qué se accionó, es decir si fue un problema de pérdida de presión del aceite hidráulico que acciona a la válvula de seguridad en sí, o se trata de un problema del oleoducto por una fuga de petróleo al ambiente por una rotura, todas estas acciones llevan entre 1 a 4 horas dependiendo de la lejanía de la válvula.

Con la propuesta realizada en este proyecto de tesis, a través del monitoreo remoto de presiones tanto del aceite hidráulico de cada válvula de seguridad como de la presión que ejerce el petróleo en el oleoducto a la entrada de cada válvula, mediante el protocolo *MQTT*, es empleado por la industria 4.0 y el internet industrial de las cosas, por su fácil implementación y basándonos con una *Raspberry Pi* como *hardware* lograremos enviar las lecturas de presión antes mencionadas a la plataforma digital *ThingSpeak*, en esta plataforma podremos tener un almacenamiento de datos los mismos que nos servirá para el modelamiento de un sistema experto desarrollado en *Matlab* en la estación de bombeo Shushufindi los cual permitirá una ágil y oportuna toma de decisiones al conocer en tiempo real cuál válvula está actuando, cual es el problema y cuáles son las soluciones que se deben tomar en cuenta, con lo que se reduciría significativamente el tiempo de respuesta ante

cualquier eventualidad tanto en la válvula de seguridad como en el tramo de oleoducto afectado dependiendo el caso.

Para poder realizar este estudio se consideró la revisión de trabajos con variables similares y a partir de las soluciones propuestas por otros investigadores trabajar en una idea que satisfaga la problemática planteada en el documento, en este sentido el trabajo denominado “Diseño de un Sistema de Radioenlaces Redundantes y de Alta Disponibilidad para transmitir información de los Sistemas de Detección de Fugas de Oleoductos, SCADA y Videovigilancia de las estaciones de la refinería Talara ubicado en Perú en el Departamento de Piura”. Esta investigación plantea el uso de sistemas basados en radioenlaces redundantes para la transmisión de datos, los mismos son obtenidos de sistemas encargados en detección de fugas en oleoductos de transporte de crudo para posteriormente ser observados y monitoreados en sistemas Scada ubicado en la refinería Talara en el Departamento de Piura. Este trabajo propone una configuración de radioenlace a partir de videovigilancia así como también un diseño realizado a medida de una miniplanta para la simulación mediante tecnologías de desarrollo de interfaces con la finalidad de visualizar el comportamiento de las variables del sistema, para lo cual emplean los siguientes instrumentos: transmisores e indicadores de flujo, válvula de control que cuentan con posicionador, variadores de velocidad y un *HMI* (interface hombre máquina), con lo cual consiguen disminuir riesgos como incendios, explosiones, fugas y robo de combustible que se originan a lo largo del oleoducto, al disminuir el tiempo de respuesta cuando se origina alguna alarma en el tramo estudiado. (Sánchez y Vargas, 2018)

En el trabajo titulado “Modelo de adquisición de datos para el monitoreo de activos mantenibles a través de un sistema de información”. Este modelo plantea las diferentes variables físicas que se pueden monitorear tales como presiones, caudales, temperaturas, vibraciones, en equipos que necesiten un mantenimiento ya sea preventivo como correctivo por medio de protocolos de comunicación utilizados por el internet de las cosas *IoT*. (Niño, 2021)

El trabajo de investigación realiza una comparativa entre *Sigfox*, *6LoWPAN*, *Zigbee* y *RFID* recomendando la utilización de *Zigbee* por utilizar el estándar *IEEE 802.15.4* y ser empleado comúnmente en redes personales inalámbricas de baja velocidad fácilmente compatible con todas las versiones de *Arduino*, con lo cual se transforma en una solución de bajo coste y altas posibilidades de escalabilidad. (Niño, 2021)

La comunicación entre *Zigbee* y *Arduino* utiliza un protocolo de comunicación basado en *I2C*, el cual es un protocolo de transferencia de datos entre distintos periféricos y

controladores a bajas e inclusive medias velocidades, para la transmisión de datos hacia la nube proponen el empleo del *Gateway Siemens IOT2040*, el mismo que usa el famoso protocolo *MQTT*, el que fue desarrollado por ingenieros de la empresa *IBM* para el monitoreo de oleoductos, con lo cual el modelo puede el monitoreo de diferentes activos productivos en instalaciones industriales. (Niño, 2021)

Por otra parte, en la investigación titulada “Desarrollo de un prototipo de un sistema de riego automatizado para el procesamiento, monitoreo y análisis de datos utilizando lógica difusa en tiempo real e *IoT* para optimizar el uso de agua aplicada en el cultivo”, emplea el uso de lógica difusa para optimizar el uso de un fluido, planteando la adquisición, procesamiento y monitoreo de 3 variables: la humedad del suelo, la humedad y temperatura ambiental. (Ortiz, 2021)

La investigación plantea el desarrollo de un prototipo que automatiza un sistema de riego en tiempo real aplicada al cultivo, haciendo uso de un experto en el área de competencia para la elaboración de las reglas composicional de inferencia con lo que se convierte en un sistema experto. En cuanto al medio físico que utiliza para la transmisión de datos a la nube utiliza un *ESP-Wroom-32 Wifi + Bluetooth* por su bajo consumo de energía y bajo coste, este dispositivo cuenta con un *firmware* de código abierto *Node MCU-32* utilizado en muchos proyectos de internet de las cosas, para la visualización de los datos utiliza un *dashboard* programado en *Eclipse Mosquitto* una plataforma ampliamente utilizada por desarrolladores de aplicaciones Web. (Ortiz, 2021)

En la siguiente investigación titulada “Diseño de un Sistema Difuso para la Detección y Ubicación de Fugas en Tuberías Horizontales”. Propone el modelamiento y validación de un sistema que ayuda a la detección de fugas utilizando variables de entrada inherentes al sistema como son: el flujo y la presión, los cuales son medidos por sensores de presión y caudal, para después las señales ser procesadas mediante el uso de lógica difusa. El sistema se encuentra ubicada en el laboratorio de Automatización de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. (Gómez et al., 2019, 277 - 290)

Para la validación del modelo propone el uso de la herramienta matemática *Simulink* de *Matlab* donde se utiliza el *toolkit Fuzzy Logic Controller* para determinar las reglas difusas y el modelamiento de los conjuntos difusos, con lo cual se obtienen un monitoreo del tramo de tubería en tiempo real determinando el lugar exacto donde se origina la fuga de gas. (Gómez et al., 2019, 277 - 290)

Para la adquisición de datos se utilizó un bastidor *NI cDAQ-9178* el cual es un módulo *NI 9203* que cuenta con entradas y salidas analógicas de 4 a 20 mili Amperios de la marca *National Instruments*, con el sistema puesto en marcha se pudo observar el comportamiento del oleoducto en condiciones normales y cuando existía alguna desviación en la presión del sistema, así mismo se concluyó que la implementación de un modelo basado en lógica difusa en este caso fue muy robusto y fácil de implementar. (Gómez et al., 2019, 277 - 290)

En la tesis titulada “Desarrollo de un sistema electrónico configurable de monitoreo remoto de PH, presión y temperatura utilizando un computador de placa reducida para el biorreactor del laboratorio de investigación de Ingeniería Industrial de la Universidad de San Martín de Porres”, la estrategia para el desarrollo de la solución al monitoreo remoto pasa por la necesidad de controlar y censar variables como: nivel de alcalinidad, nivel de acidez, presión y temperatura de la mezcla dentro de un *Biorreactor FIA*, para lo cual hace uso de un ordenador de placa reducida llamado *Raspberry Pi* concretamente la versión 3+, por tener un coste muy bajo a diferencia de un *PLC*, además el sistema operativo basado en Linux lo hace muy versátil y escalable para publicar los datos obtenidos del *Biorreactor FIA*. Utilizando la plataforma *ThingSpeak* perteneciente a *Matlab* en donde se puede visualizar datos históricos para el análisis de las diferentes curvas y parámetros estadísticos, con esto el usuario pueda realizar el estudio del comportamiento en el tiempo de los parámetros para una toma de decisiones más ágil. (Andrés et al., 2019)

Finalmente se presenta el trabajo titulado “Diseño y desarrollo de un sistema de monitoreo remoto implementando Internet de las cosas”, del cual se desprende la necesidad imperiosa de medir y monitorear las variables del entorno en tiempo real sin importar la distancia o el equipo, dentro de la industrial la necesidad de una hiperconexión de todas las máquinas y procesos que se encuentran en el entorno se denomina industria 4.0, lo que con ayuda del Internet de las cosas busca la convergencia del ámbito físico con los entornos virtuales. El trabajo se llevó a cabo en México, en la ciudad de Guadalajara, logrando monitorear parámetros físicos como temperatura del ambiente, humedad y presión atmosférica, para este paso se decidió utilizar una *Raspberry Pi* modelo 3, los datos se almacenaron en dicho computador fueron enviados a la nube por medio de un servidor web basado en *Apache2*, *MariaDB*, *PHP 7.3*, *MySQL* y *PHPMysqlAdmin*; bajo la filosofía *LAMP* (*Linux*, *Apache*, *MySQL*, *PHP*). Por el lado del software utiliza una interfaz gráfica donde el usuario podrá interactuar con el sistema de manera intuitiva. (Aguilar et al., 2020)

Una vez revisado todos los proyectos anteriormente citados permite tener un punto de vista muy amplio en cuanto a enfoques que pueden ajustarse al problema planteado en este documento, los métodos observados no abarcan una solución integral es decir que los datos obtenidos de cualquier variable física observada y medida se procesen en un equipo y después se los envíe a una plataforma en la nube para posteriormente en otro lugar tratarlos y obtener un resultado satisfactorio, todas las investigaciones previas atacan el problema por partes, por tal razón se encuentra una oportunidad de mejora al unir todos los conceptos y propuestas para así presentar un modelo completo.

La propuesta planteada cuenta con dos partes fundamentales que son, la adquisición de datos provenientes de los transmisores de presión tanto del oleoducto que transporta crudo como del tanque reservorio de aceite hidráulico en la válvula de seguridad, es tecnología de código abierto de una *Raspberry Pi modelo 3+*, la cual contará con un conversor analógico a digital *ADS-1115* compatible con este tipo de dispositivos, en cuanto a la programación para enviar los datos obtenidos utilizaremos de dentro del entorno computacional de *Raspbian* del *Raspberry Pi* la herramienta llamada *Node-Red*, nos permitirá programar con un lenguaje de alto nivel la configuración del protocolo *MQTT* de manera fácil y rápida.

El nexa entre la *Raspberry Pi 3+* y el entorno matemático de *Simulink* será la plataforma digital *ThingSpeak* perteneciente a *Matlab*, en donde se diseñará una serie de *dashboard*, con el objetivo de visualizar y almacenar los datos.

Por otra parte, se utilizará el entorno de programación llamado *Simulink* de *Matlab* para procesar los datos alojados en *ThingSpeak* mediante el modelado de un sistema experto basado en lógica difusa utilizando los *toolkit Fuzzy Logic Controller*, para obtener un monitoreo remoto en tiempo real.

1.2. Proceso investigativo metodológico

El tipo de enfoque que se emplea en la investigación propuesta en este documento es cuantitativo ya que se basa en la experiencia y observancia de hechos físicos, los mismos que son procesados e interpretados por diferentes técnicas numéricas para el contraste y fiabilidad de sus resultados (Jiménez, 2020, pág 59-68), puntualizando el enfoque obtenemos que será de índole descriptivo puesto que las variables a medirse son presiones mostrando así el comportamiento de un fluido en una válvula y en un oleoducto.

La investigación planteada presentará un diseño experimental puesto que manipulará las variables guardadas en una base de datos para obtener un sistema experto basado en lógica

difusa utilizando el método de Mandani, con lo cual se pretende mejorar la toma de decisiones de los operadores de la estación de bombeo Shushufindi.

El método usado será el de observación experimental puesto que con él se recolecta la información necesaria para la determinación de las variables a emplearse en el proyecto descrito en este documento, además se llevará a cabo entrevistas personales a cada uno de los operadores que trabajan en la estación de bombeo Shushufindi con el objetivo de recabar datos pertinentes que nos ayudará a delimitar las variables, así como también conocer las soluciones asociados a cada uno de los problemas que suceden tanto en el oleoducto como en la válvula de seguridad.

En cuanto a las técnicas aplicadas en la investigación propuesta se tomarán tres tipos primero utilizaremos la observación de las variables en campo que con ayuda de sensores mediremos y acondicionamos para que las tarjetas electrónicas puedan enviar los datos por medio de plataformas informáticas basadas en IoT, por otro lado la encuesta ayudará en el desarrollo de la inferencia difusa y así poder construir los conjuntos difusos necesarios para el proyecto, y por último la experimentación en un entorno controlado para la validación de los datos esperados por el sistema como respuesta a desviaciones en las variables medidas.

En cuanto a la población que se emplea será de mucha ayuda los 4 operadores de la planta de bombeo ubicada en Shushufindi, puesto que son ellos los que cuentan con la experticia del trabajo diario y conocen a la perfección el actuar de los parámetros estudiados en este proyecto, así como los problemas en caso de desviaciones o perturbaciones de las variables procesadas y sus posibles soluciones, con este conocimiento podremos desarrollar un sistema experto el cual nos indique el problema exacto que está ocurriendo, el lugar preciso donde ocurre el problema y las soluciones que se deben realizar optimizando el tiempo de respuesta y agilizando la toma de decisiones.

CAPÍTULO II: PROPUESTA

2.1 Fundamentos teóricos aplicados

Introducción

Hoy en día la industria está cambiando de paradigma y se está volcando hacia la industria 4.0, para lograr este cambio es necesario que la industria esté dispuesta a una reingeniería con la adhesión de nuevas herramientas, es ahí donde los sistemas *IoT* (internet de las cosas) son más utilizados puesto que ayuda a optimizar el uso de recursos como activos mantenibles de una empresa además las incorporaciones de este tipo de tecnologías minimizan las pérdidas económicas gracias al monitoreo remoto de procesos sensibles con la detección y predicción de fallos. Para Rozo (2020) la industria 4.0 representa la digitalización de sistemas así como los procesos industriales y su interconexión mediante el Internet industrial de las Cosas con lo cual describe a las empresas como fábricas del futuro o fábricas inteligentes consiguiendo que las soluciones sean flexibles y lo más importante autónomas.

Para otros autores como Ramírez et al (2019) la industria 4.0 tiene como principal objetivo que una fábrica sea flexible e inteligente con procesos auto controlados y que sea capaz de la detección de los errores antes de que sucedan o que los corrijan en el momento con la menor cantidad de retardo y que permitan la reconfiguración de la producción y la personalización de los productos sin incrementar el costo, esto haría que una empresa de cualquier industria sea más eficiente.

Para abordar el presente proyecto de investigación nos enfocaremos en conceptos generales de sistemas expertos en combinación con lógica difusa, nos permita desarrollar un sistema basado en la arquitectura del internet de las cosas, logrando de esta manera integrar en un todo los conceptos propuestos.

Sistemas expertos

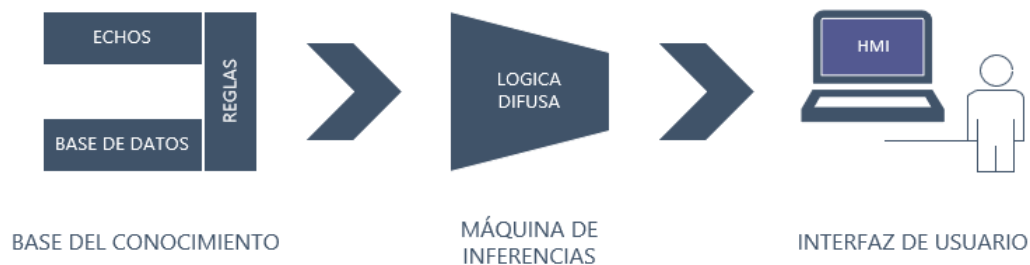
En algunas ocasiones a las personas les gustaría que un computador muestre una solución a partir de datos conocidos, en la mayoría de ocasiones el ser humano no conoce las respuestas de un campo en específico de la ciencia y se apoya de expertos para poder solucionar algún problema, es así cuando un vehículo tiene problemas de funcionamiento los propietarios lo llevan a un mecánico, en este caso un experto, en este ejemplo el mecánico gracias a su vasto conocimiento y experticia en la rama automotriz logra diagnosticar la falla y en todos los casos lo podrá reparar. (Mathivet, 2018)

Es así como funciona un sistema experto; básicamente intenta predecir la probabilidad más alta de un conjunto de solución bajo una serie de reglas o condiciones, tratando de asemejarse lo más posible al razonamiento de un humano experto en un tema en específico. (Ríos Insua & Gómez-Ullate Oteiza, 2019)

Para este caso de estudio en concreto se toma un modelo de sistema experto reducido enfocando a tres componentes fundamentales como son la base del conocimiento, máquina de inferencia y la interfaz de usuario.

Figura 1

Arquitectura de un sistema experto



Nota. En la figura se muestra un sistema experto reducido ajustado al proyecto de investigación de un sistema remoto de monitoreo.

Base del conocimiento

Es la parte del sistema experto; contiene el conocimiento necesario sobre un campo en específico, para comprender y resolver problemas para lo cual comprende tres aspectos muy importantes, el primero son los hechos los mismos son proporcionados por los expertos mediante encuestas o preguntas directas sobre problemáticas que se asocian a las variables estudiadas y las posibles soluciones para estas desviaciones, por otro lado tenemos a la base de datos que se refiere a las variables físicas estudiadas y su forma de obtenerlas, y por último tenemos las reglas que son estructuras condicionales que relacionan lógicamente la información obtenida por los expertos con la información recopilada por la base de datos generalmente tienen condicionales [SI - ENTONCES]. (Zerpa et al., 2018)

Máquina de inferencia

Este apartado comprende todas las metodologías capaces de traducir la base del conocimiento; como la lógica difusa para determinar el camino más adecuado en situaciones de incertidumbre, generalmente construido o elaborado en un programa informático de base matemática. (VERA, 2021)

Interfaz de usuario

Es el entorno visual que sirve como medio de comunicación entre el usuario final y el sistema experto, la interfaz hombre máquina debe ser altamente interactiva y contener un lenguaje natural nada especializado con gráficos amigables, comprensibles y entendibles a cualquier persona, con lo que lograremos una ágil utilización del sistema experto. (López, 2018)

Lógica difusa

La lógica difusa es una técnica desarrollada para imitar el comportamiento humano lo más cercano a la realidad, mientras que la lógica clásicamente se define como una ciencia que estudia las normativas del razonamiento y los principios formales, la lógica difusa se basa en el estudio del razonamiento aproximado, por lo que es ampliamente utilizado para modelar problemas no-lineales gracias a su tolerancia a la imprecisión o un nivel alto de incertidumbre con una base que en el lenguaje natural. (Ramírez, 2019)

Esta herramienta surge del desarrollo de la teoría de conjuntos, ya que un conjunto se representa como la agrupación de objetos los cuales son distintos entre sí pero que guardan concordancia en una o más características comunes, estas similitudes determinan la pertenencia del elemento con el conjunto universo y se lo determina con algebra booleana. (Ramírez, 2019)

Conjuntos difusos

Por otra parte los conjunto difusos son una extensión de la teoría de conjuntos clásica, los que determinan el grado de pertenencia de un elemento con respecto al conjunto, teniendo un rango amplio de valores que van de 0 a 1, cuando se acerca al 0 disminuye el grado de pertenencia o en definitiva el elemento no pertenece al conjunto y aproximándose al valor 1 el elemento tienen un alto grado de pertenencia, este concepto nos lleva a nociones lingüísticas como muy alto, alto, medio, bajo, muy bajo, extremadamente bajo, las mismas que denotan cuanto un elemento puede pertenecer o no a un conjunto, (Molina & Hurtado, 2019) matemáticamente se define a los conjuntos difusos como:

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in X\} \text{ donde:}$$

A , es el conjunto difuso

X , es el universo del discurso

$\mu_A(x)$, es la función de membresía, la misma que es definida por:

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$$

$$x \rightarrow \mu_A(x)$$

$\mu_A(x)$, representa el grado de pertenencia de de X en A

Funciones de membresía

Existen dos tipos de funciones de pertenencia, las lineales y las curvas o no lineales, para nuestro caso de estudio utilizaremos las lineales trapezoidales y lineales triangulares puesto que son las más comunes en controladores difusos.

Función de pertenencia triangular

Esta función se determinada por la siguiente notación matemática, donde está definida por su límite superior b , y su límite inferior a y m , es su valor modal.

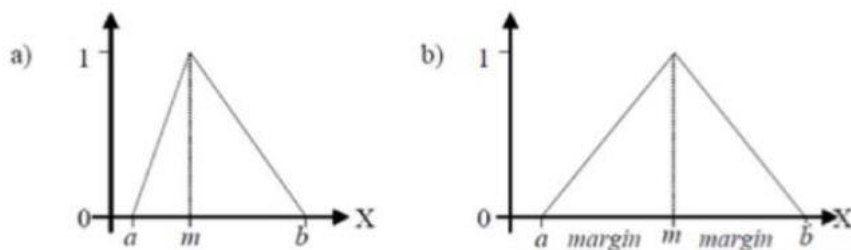
$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ (x - a)/(m - a), & x \in (a, m] \\ (b - x)/(b - m), & x \in (m, b] \\ 0, & x \geq b \end{cases}$$

Figura 2

Figura 2:

Figura 2

Función de pertenencia triangular



Nota. a) conjunto triangular general, b) conjunto triangular simétrico. Reproducida de grafico de Molina, 2019 (<https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/15872>)

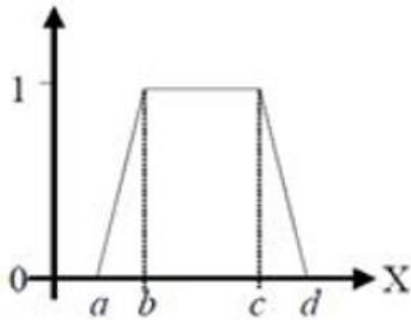
Función de pertenencia trapezoidal

Esta función se determinada por la siguiente notación matemática, donde está definida por su límite superior d , y su límite inferior a y un límite superior e inferior de sus núcleos b y c .

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & (x \leq a) \text{ o } (x \geq d) \\ (x - a)/(b - a), & x \in (a, b] \\ 1, & x \in (b, c) \\ (d - x)/(d - c), & x \in (b, d] \end{cases}$$

Figura 3

Función de pertenencia trapezoidal



Nota. Cuando los límites núcleo coinciden con los límites del conjunto se los llama funciones de pertenencia L. Reproducida de grafico de Molina, 2019 (<https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/15872>)

Sistema de control difuso

El control difuso realiza abstracción de las variables de entrada combinadas con las reglas lingüísticas para así poder obtener una respuesta probabilística de pertenencia aproximado generalmente se compone generalmente de tres etapas, la Fuzzificación, el mecanismo de inferencia y la Defuzzificación.

La fuzzificación

En este bloque a cada variable de entrada se le asigna un valor de pertenencia dentro de los conjuntos difusos, es así que las entradas al bloque de Fuzzificación son valores concretos de las variables y las salidas corresponden a un grado de pertenencia a los conjuntos difusos. (Kouro & Musalem, 2019)

Mecanismo de inferencia

Determinan a las reglas que asocian los conjuntos difusos de entrada con los conjuntos difusos de salida ambos determinados en grados de pertenencia, estas reglas modelan el sistema difuso para ser interpretada como una implicación difusa, las reglas más usadas toman la forma descrita. (Kouro & Musalem, 2019)

SI U_1 es A_1 y U_2 es A_2 y U_3 es A_3 ENTONCES v es B

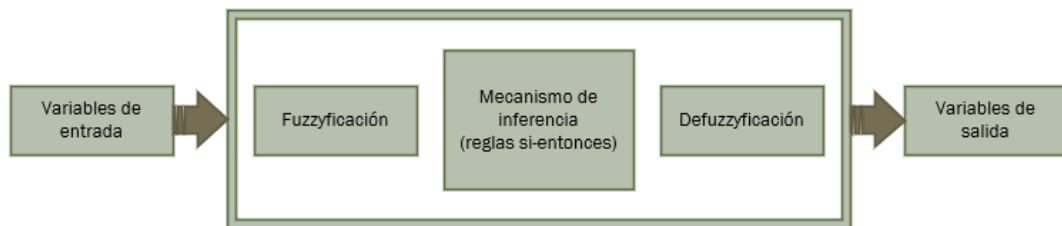
En donde podemos notar que los conectores lógicos son [SI - ENTONCES].

La defuzzificación

En este bloque lo que ocurre es que con ayuda de las matemáticas transforma los conjuntos difusos resultantes del mecanismo de inferencia en un valor concreto, en otras palabras, el resultado. (Kouro & Musalem, 2019)

Figura 4

Sistema de control difuso



Nota. Arquitectura básica de un controlador difuso

Computación en la nube

Es un modelo que permite el acceso bajo demanda a través de la red a un conjunto compartido de recursos de computación configurables (como por ejemplo red, servidores, almacenamiento, aplicaciones y servicios) que pueden ser rápidamente provisionados con el mínimo esfuerzo de gestión o interacción del proveedor del servicio. (Mell & Grance, 2021)

Una vez que los datos se encuentran en la nube y se los puede ver por diferentes plataformas en cualquier lugar del mundo, los sistemas expertos pueden ayudar a la toma de decisiones mediante el uso de lógica difusa, estos sistemas expertos fueron desarrollados en los años ochenta, en esa época pasaron desapercibidos, no es hasta algunos años atrás que gracias al poder de cómputo se los utiliza como una alternativa viable para la toma de decisiones mediante la captura del conocimiento y experiencia de un individuo en un campo específico logrando responder preguntas repetitivas para cuando el individuo no se encuentre. (Schmuller, 2019)

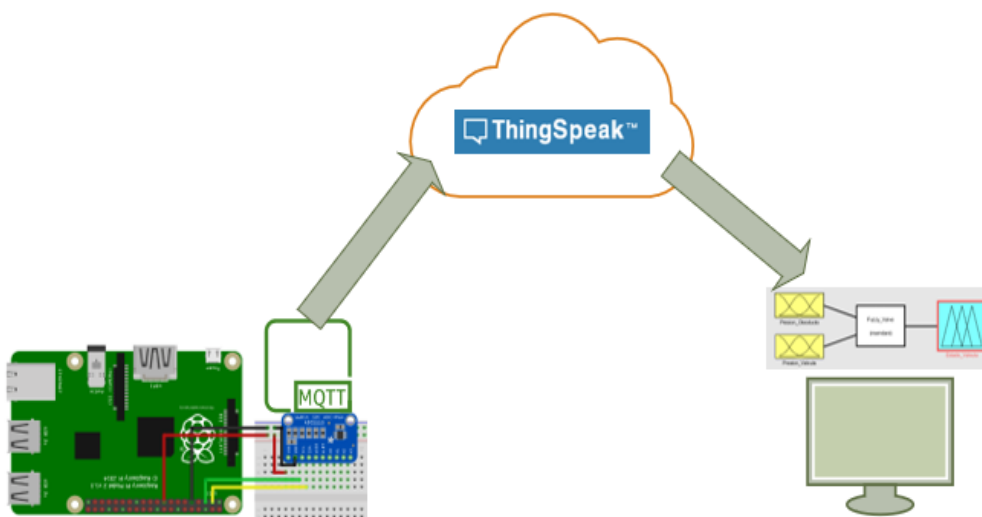
2.2 Descripción de la propuesta

Estructura general

El trabajo descrito en el presente documento trata sobre el diseño de un sistema de monitoreo remoto basado en sistemas expertos, el cual se representa en la gráfica 5. En la misma se observa 3 etapas muy bien definidas, la primera es la recolección de datos, se llevará a cabo en el camper ubicado en el oleoducto donde se encuentra la válvula de seguridad, una vez recolectados los datos en la *Raspberry pi*, la segunda etapa consiste en el envío y almacenamiento de los datos en la nube para lo cual emplearemos la plataforma llamada *ThingSpeak*, por último la tercera etapa que se llevará a cabo en la estación de bombeo Shushufindi, donde los datos se procesaron mediante lógica difusa y presentará los resultados en una aplicación amigable para los operadores de la estación.

Figura 5

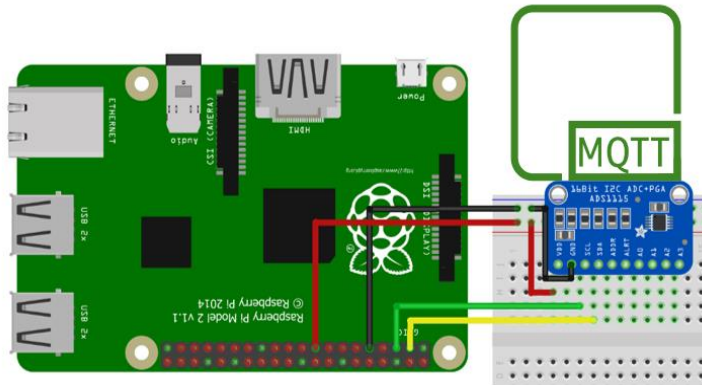
Esquema del sistema monitoreo remoto



Después de identificar todos los elementos en cuanto, que se necesitan para el desarrollo del sistema de monitoreo remoto basado en sistemas expertos, para la obtención o recolección de datos se utilizará un conversor analógico digital *ADS-1115*, el cual acoplado a la placa *Raspberry Pi* obtendremos voltajes de 0.01 a 3.3, con la ayuda de la herramienta *Node Red* emplearemos el protocolo de comunicación *MQTT* para el envío de datos hacia la nube.

Figura 6

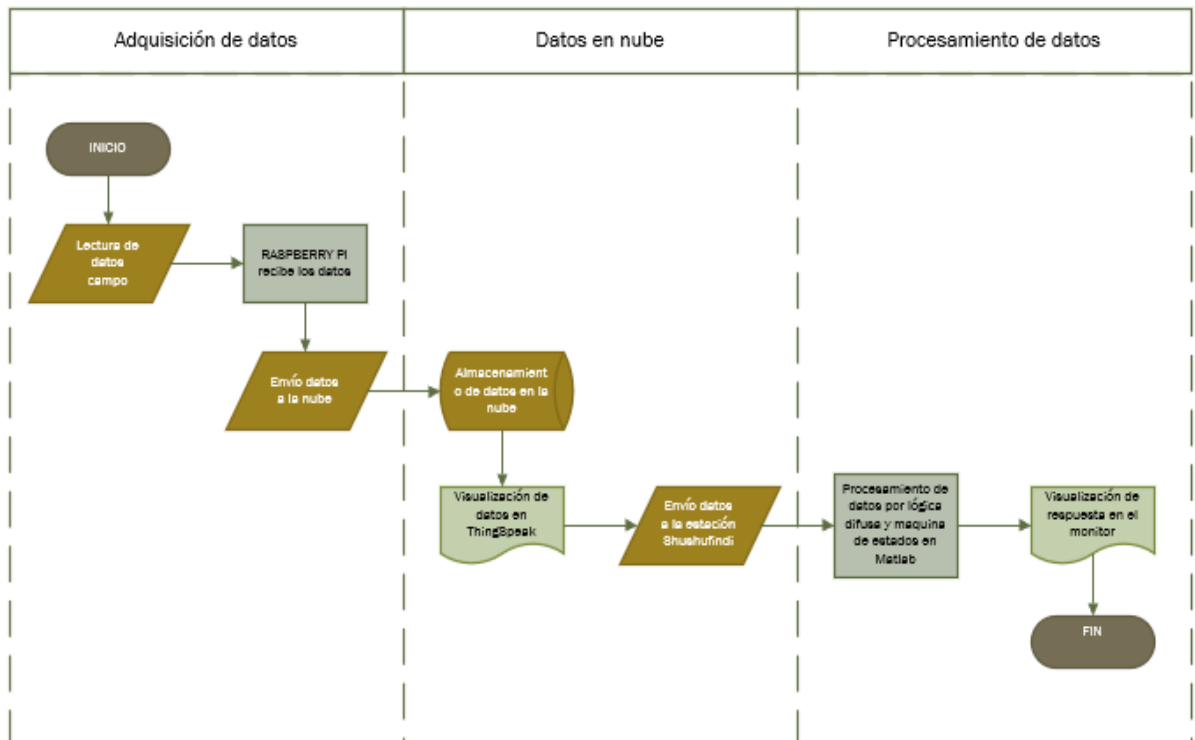
Circuito obtención de datos



Basados en los elementos explicados anteriormente, procedemos a realizar un diagrama de flujo en el cual se observa con más claridad el proceso que tendrán los datos desde su origen (válvula de seguridad en el oleoducto de crudo), hasta su tratamiento en la estación de bombeo Shushufindi.

Figura 7

Diagrama de flujo del sistema de monitoreo remoto



Explicación del aporte Estrategias y/o técnicas

Para el desarrollo del sistema de monitoreo remoto basado en sistemas expertos se dio inicio con los siguientes pasos.

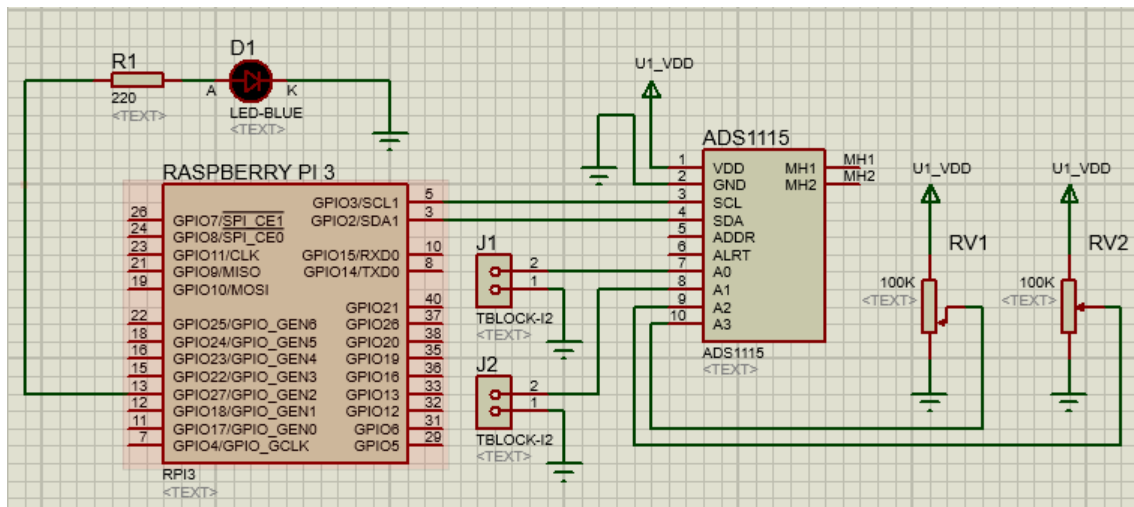
Adquisición de datos

Para esta etapa se espera que la señal recibida por la válvula de seguridad sea de 0.01 voltios a 3.3 voltios puesto que la *Raspberry Pi* solo acepta ese nivel de voltaje y valores booleanos, por lo cual se diseña un circuito que tenga como interfaz un módulo conversor analógico digital (*ADS-1115*), con el que se tiene una precisión de 16-bit y cuenta con 4 puertos de los cuales se utilizara 2 de ellos.

La confección entre *Raspberry Pi* y el módulo *ADS-1115* se realizó por el protocolo de comunicación *I2C*, el cual es muy utilizado cuando se necesita comunicar sensores con el dispositivo destino por su simplicidad a dos hilos de conexión y con un *bit* de confirmación de recepción de datos.

Figura 8

Circuito de adquisición de datos



Nota. Conexión utilizando el protocolo de comunicación *I2C* entre *Raspberry Pi* y *ADS-1115*

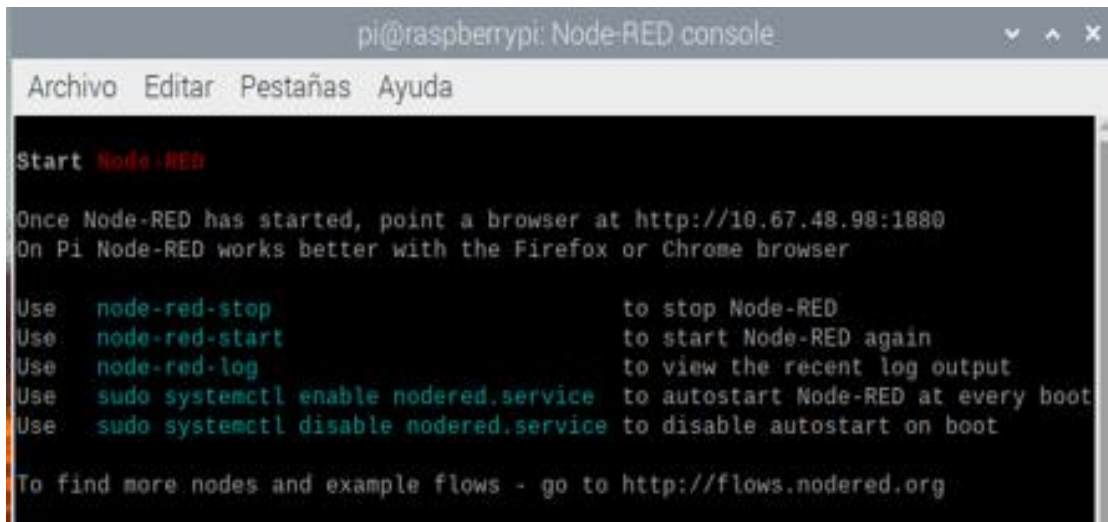
Programación de Raspberry Pi

En cuanto a la programación de la *Raspberry Pi*, se utiliza la herramienta *Node Red*, el cual nos permitirá conectar los dispositivos con los servicios en línea que escojamos en este caso enviaremos los datos a la nube por medio del protocolo de comunicación *MQTT* hacia la plataforma de visualización en línea *ThingSpeak*.

Node Red, en el sistema operativo *Raspbian* basado en *Linux*, de la computadora de bolsillo *Raspberry Pi* ya viene preinstalado, al cual se accedió mediante su dirección IP, y el puerto 1880 de la siguiente forma: 10.67.48.98:1880 como se muestra en la Figura 9

Figura 9

Inicialización de Node RED



```
pi@raspberrypi: Node-RED console
Archivo  Editar  Pestañas  Ayuda

Start Node-RED

Once Node-RED has started, point a browser at http://10.67.48.98:1880
On Pi Node-RED works better with the Firefox or Chrome browser

Use  node-red-stop          to stop Node-RED
Use  node-red-start        to start Node-RED again
Use  node-red-log          to view the recent log output
Use  sudo systemctl enable nodered.service to autostart Node-RED at every boot
Use  sudo systemctl disable nodered.service to disable autostart on boot

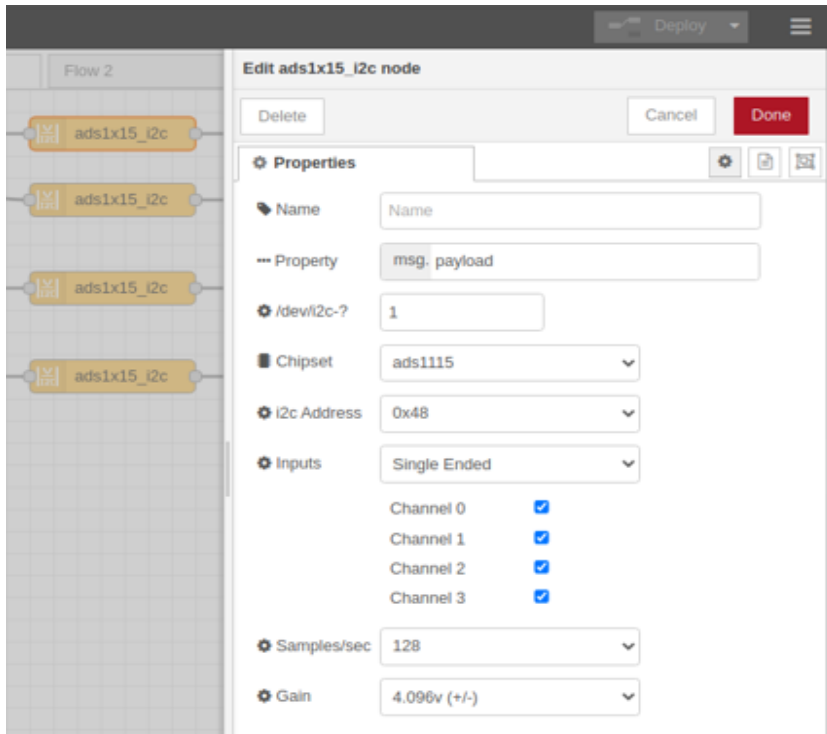
To find more nodes and example flows - go to http://flows.nodered.org
```

Nota. Inicialización de Node Red, se utiliza el comando “sudo systemctl enable nodered.service”, para que se inicie automáticamente el programa de Node Red y comience a transmitir los datos a la nube.

En cuanto a las librerías que se utilizaron para la adquisición de datos del *ADS-1115*, como el módulo utiliza un comunicación serial basada en *I2C* se utiliza “node-red-contrib-ads1x15_i2c”, la cual nos permite con una configuración simple para la lectura de los datos en los puertos A0 y A1 de nuestro módulo (Ver Figura 10), por otro lado la comunicación *MQTT* cuenta varias librerías en nuestro caso utilizamos “node-red-contrib-ThingSpeak”, el cual configura la comunicación con la plataforma *ThingSpeak* de manera ágil y rápida, lo cual se muestra en la Figura 11

Figura 10

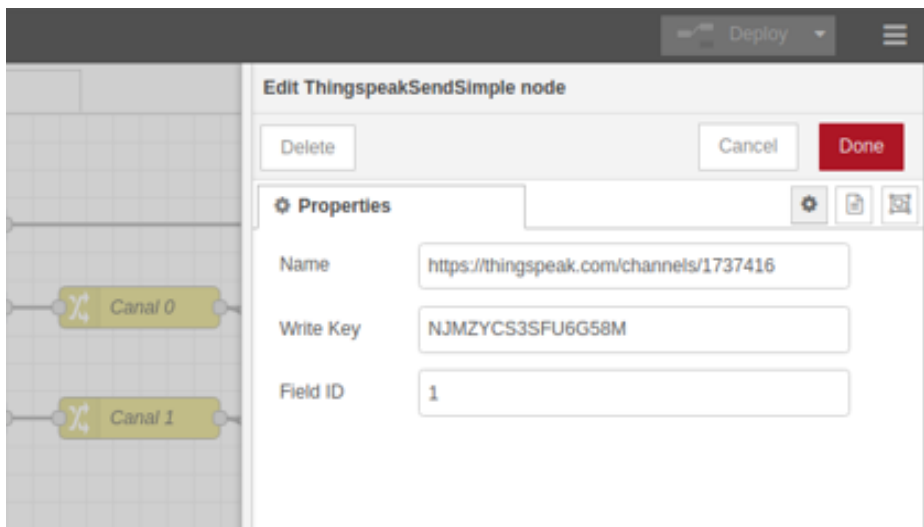
Configuración de la librería ADS1x15_i2c



Nota. En el cuadro de diálogo se escoge el puerto a monitorear y la ganancia en este caso se tienen como parámetro 1, puesto que no se necesita modificar el valor obtenido.

Figura 11

Configuración de la librería ThingspeakSendSimple



Nota. En el cuadro de diálogo se introducen las credenciales configuradas en la plataforma ThingSpeak y se configura el número de cada campo (Field).

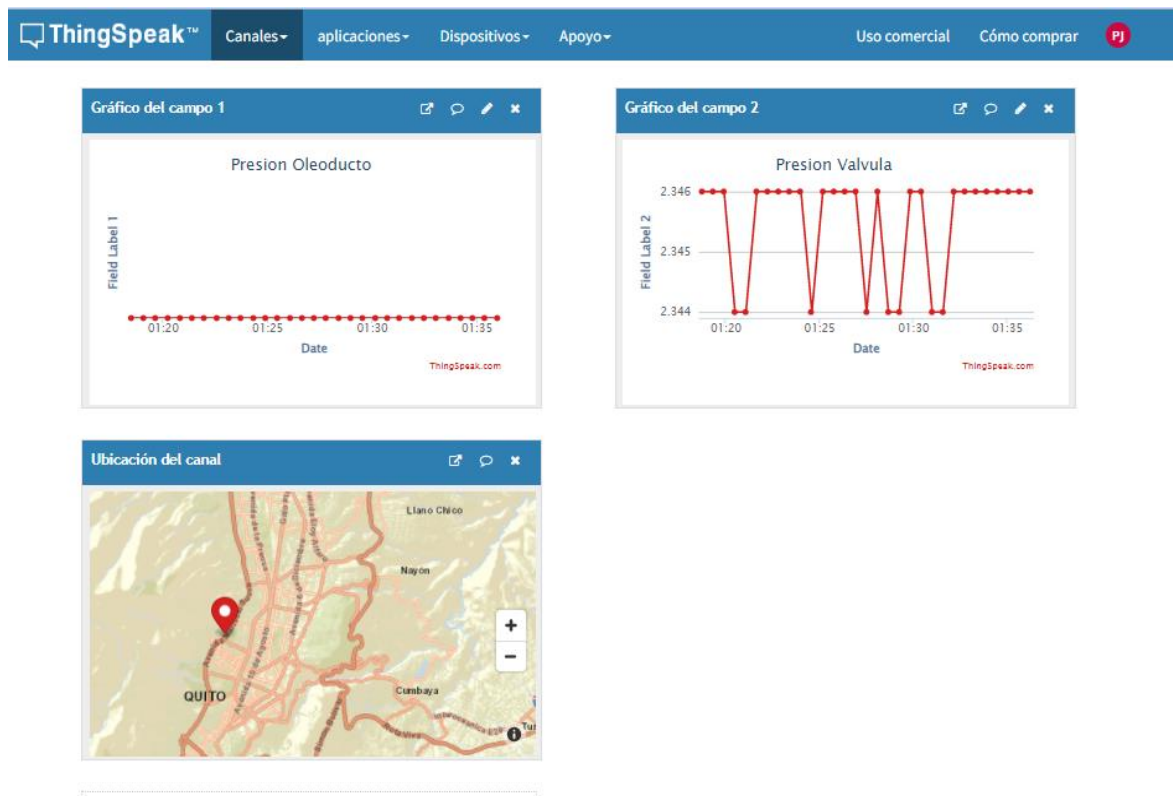
Almacenamiento y pre visualización de datos en la nube

Para la previsualización y el almacenamiento de los datos en la nube se configura la plataforma IoT *ThingSpeak* de *Matlab* la cual nos permite el análisis y visualización de flujos de datos en tiempo real, esta plataforma es el puente que existirá entre nuestro dispositivo ubicado en las válvulas del oleoducto y la estación de bombeo Shushufindi.

La configuración inicia con la creación de una cuenta, para posteriormente crear los campos o *Field* que utilizaremos en nuestro caso son dos más un *widget* de ubicación el mismo que se configura con las coordenadas de las válvulas a monitorear.

Figura 12

Plataforma ThingSpeak



En el apartado Claves Api, ubicado en el menú superior se obtendrán las credenciales necesarias para la comunicación entre *ThingSpeak* con la *Raspberry Pi* con y con la estación de bombeo Shushufindi que contará con el programa en *Simulink* de *Matlab*.

Figura 13

Credenciales de identificación del canal en *ThingSpeak*



Desarrollo del sistema experto

Una vez que se tiene la información en la nube se realiza el tratamiento de los datos en el entorno de programación de *Matlab* llamado *Simulink*, para lo cual se emplea el método de Mandani, el mismo que cuenta con 4 pasos para su desarrollo:

Variables lingüísticas:

El primer paso se refiere a la determinación de las variables lingüísticas tanto de entrada como de salida, así como también su universo y sus funciones de pertenencia, para el presente caso de estudio tenemos 2 variables de entrada que son la Presión Oleoducto y la Presión Válvula, que da como resultado la Estado Válvula, las cuales se detallan a continuación:

Variable Presión Oleoducto:

Universo del discurso: $X = [0,120]$ Psi

Conjuntos difusos:

OPMB = [0, 0, 20, 45] Función trapezoidal

OPB = [25, 50, 70] Función triangular

OPN = [55, 70, 80, 95] Función trapezoidal

OPA = [85, 95, 105] Función triangular

OPMA = [100, 110, 120, 120] Función trapezoidal, donde:

OPMB es presión del oleoducto muy baja, OPB es presión del oleoducto baja, OPN es presión del oleoducto normal, OPA es presión del oleoducto alta, OPMA es presión del oleoducto muy alta.

Variable Presión Válvula:

Universo del discurso: $X = [0, 50]$ Psi

Conjuntos difusos:

VPMB = [0, 0, 10, 20] Función trapezoidal

VPB = [10, 20, 35, 45] Función trapezoidal

VPN = [35, 45, 50, 50] Función trapezoidal, donde:

VPMB es presión de la válvula muy baja, VPB es presión de la válvula baja, VPN es presión de la válvula normal.

Variable Estado Válvula:

Universo del discurso: $X = [0, 100]$ %

Conjuntos difusos:

VC = [0, 0, 20, 40] Función trapezoidal

VEV = [15, 35, 60, 80] Función trapezoidal

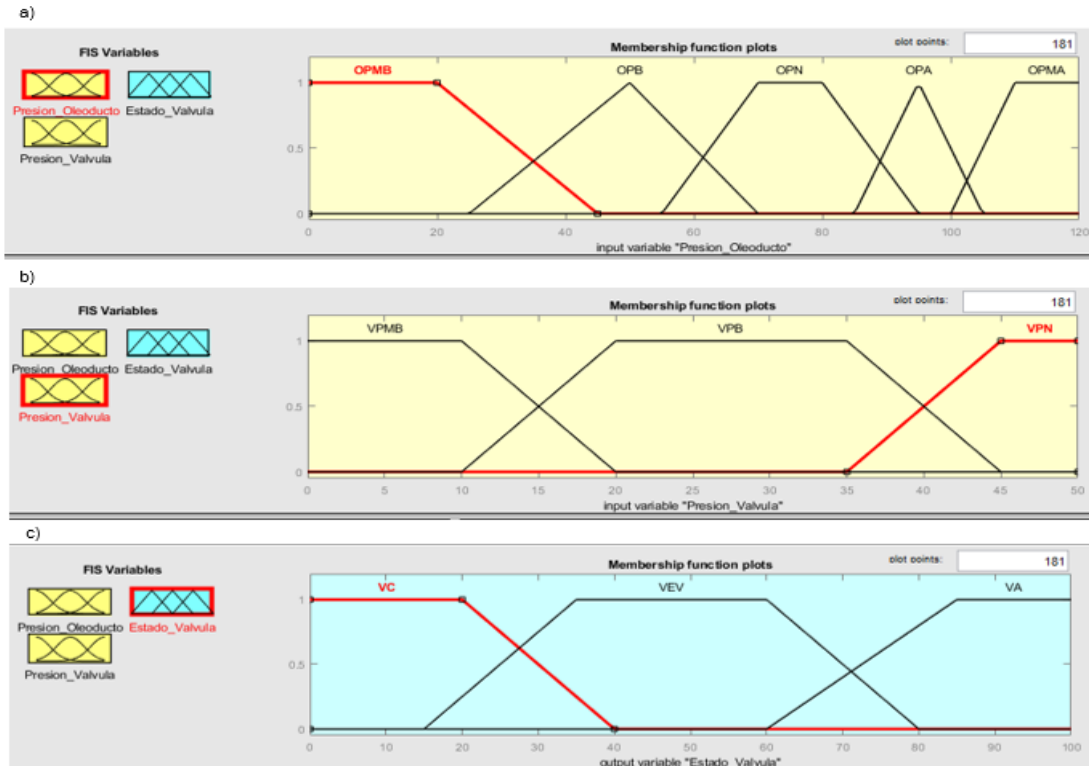
VA = [60, 85, 100, 100] Función trapezoidal, donde:

VC es válvula cerrada, VEV es válvula en viaje, VA es válvula abierta.

Para el modelamiento de la lógica difusa se utiliza la herramienta de *Matlab* llamada *Fuzzy* misma que se introducen los datos obtenidos previamente como se muestra a continuación.

Figura 14

Configuración de los conjuntos difusos en Matlab



Nota. a) Variable Presión_Oleoducto, b) Variable Presión_Válvula, c) Variable Estado_Válvula

Base de reglas:

En este paso desarrollaremos la estrategia de control apoyados por la entrevista a 4 expertos los cuales trabajan a diario en la estación de bombeo Shushufindi, con lo cual nos queda la tabla mostrada a continuación.

Tabla 1

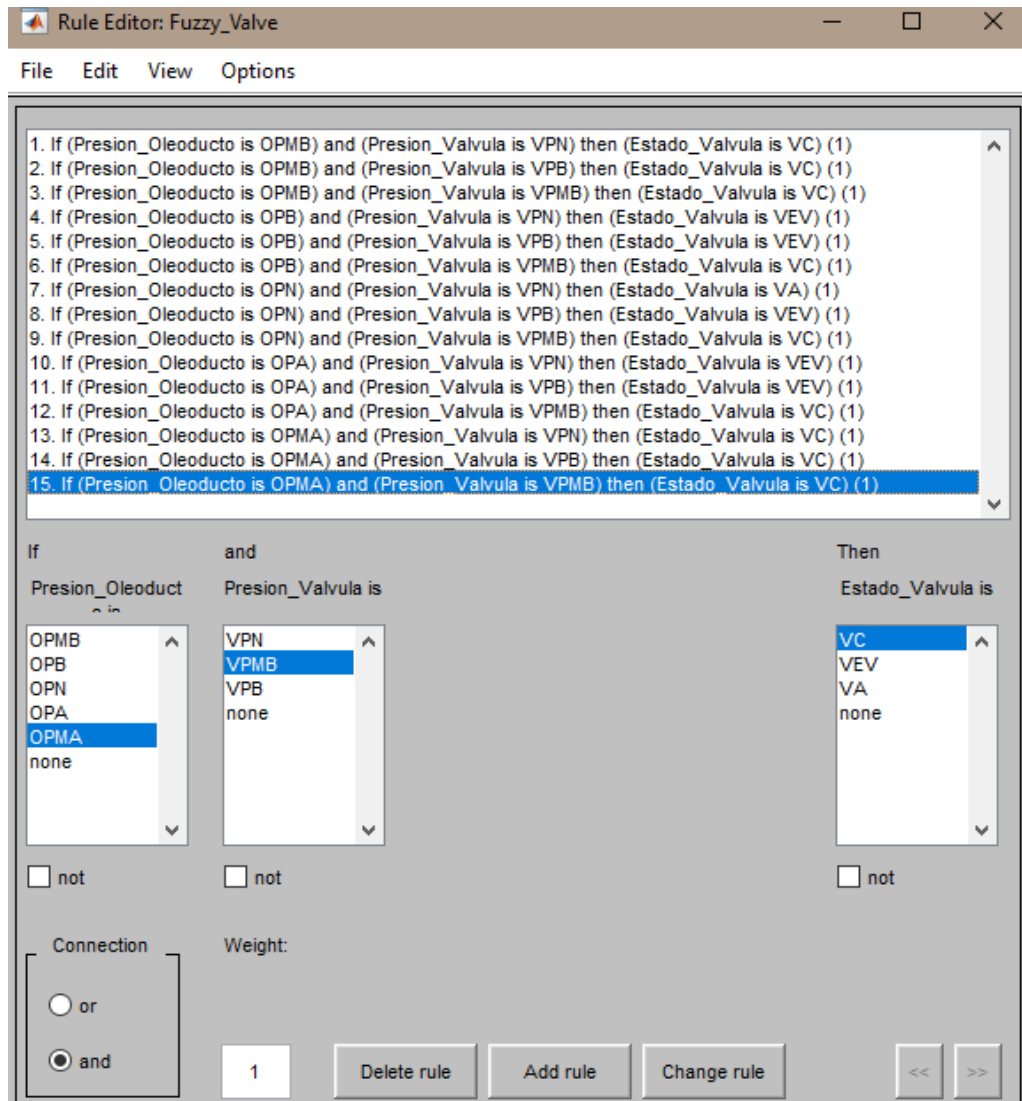
Base de reglas difusa

		Presión Oleoducto				
		OPMB	OPB	OPN	OPA	OPMA
Presión Válvula	VPN	VC	VEV	VA	VEV	VC
	VPB	VC	VEV	VEV	VEV	VC
	VPMB	VC	VC	VC	VC	VC

Con lo cual se crean las reglas del sistema difuso utilizando los conectores SI- ENTONCES, dependiendo de las variables de entrada y de los conjuntos difusos resultantes, para ello se emplea el toolkit de *Matlab* llamado *Fuzzy*.

Figura 15

Base de reglas difusas en Matlab

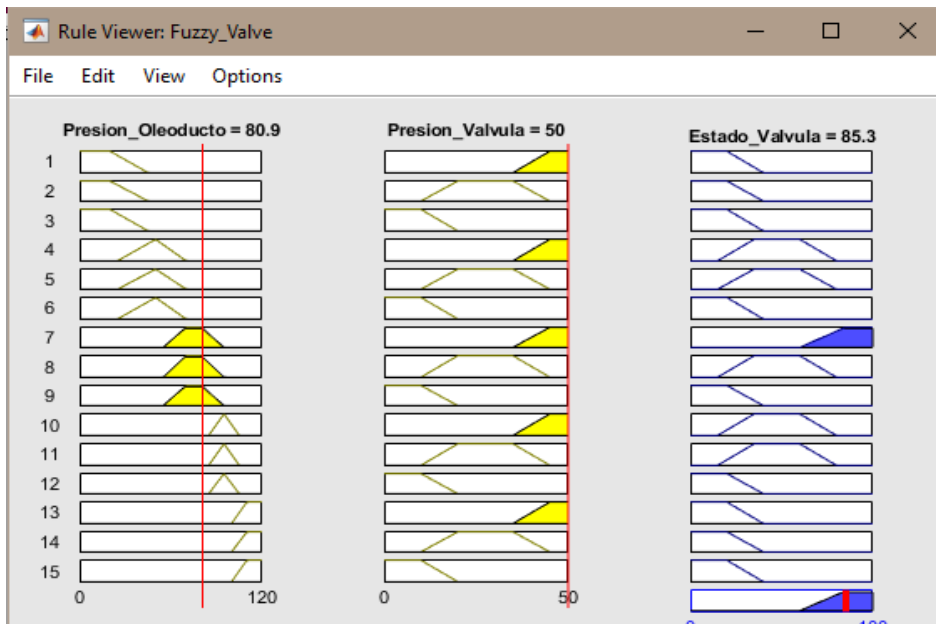


Fuzzificar:

Encontraremos los grados de pertenencia y evaluaremos con las reglas de control apoyados en la herramienta de *Matlab* descrita anteriormente, en la cual veremos el grado de pertenencia de todos los valores como ejemplo tenemos que para los valores de entrada de Presión Oleoducto = 80.9 Psi y Presión Válvula = 50 Psi, se tiene un valor de membresía de 85.3, lo que es igual a que se encuentra en funcionamiento normal el oleoducto y la válvula.

Figura 16

Fuzzificación en la herramienta de Matlab

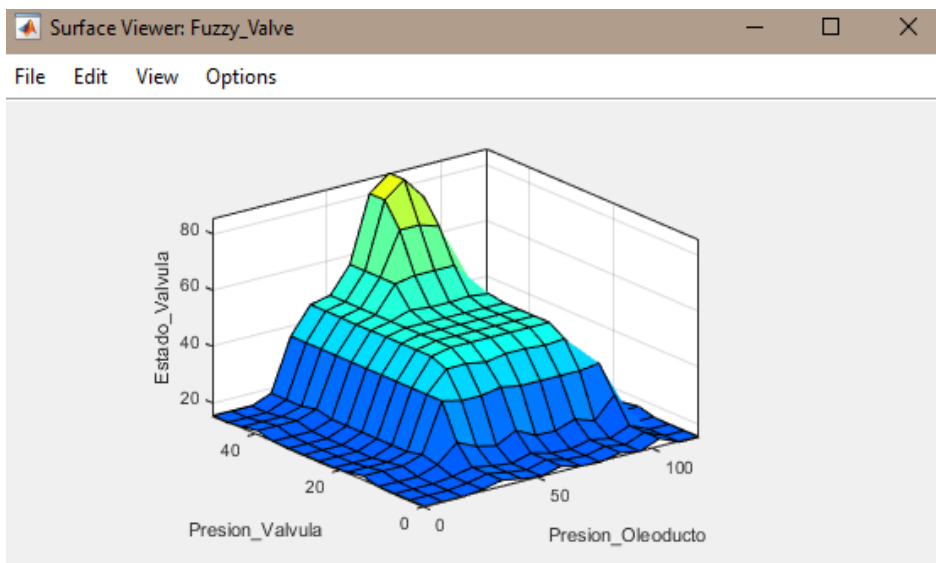


Defuzzificar:

Para la defuzzificación, se configura el método del centroide con el cual se traduce matemáticamente todo el proceso Mandani, obteniendo el siguiente gráfico, donde se puede ver el comportamiento de las variables de entrada en combinación con las reglas de inferencia.

Figura 17

Defuzzificación con Matlab

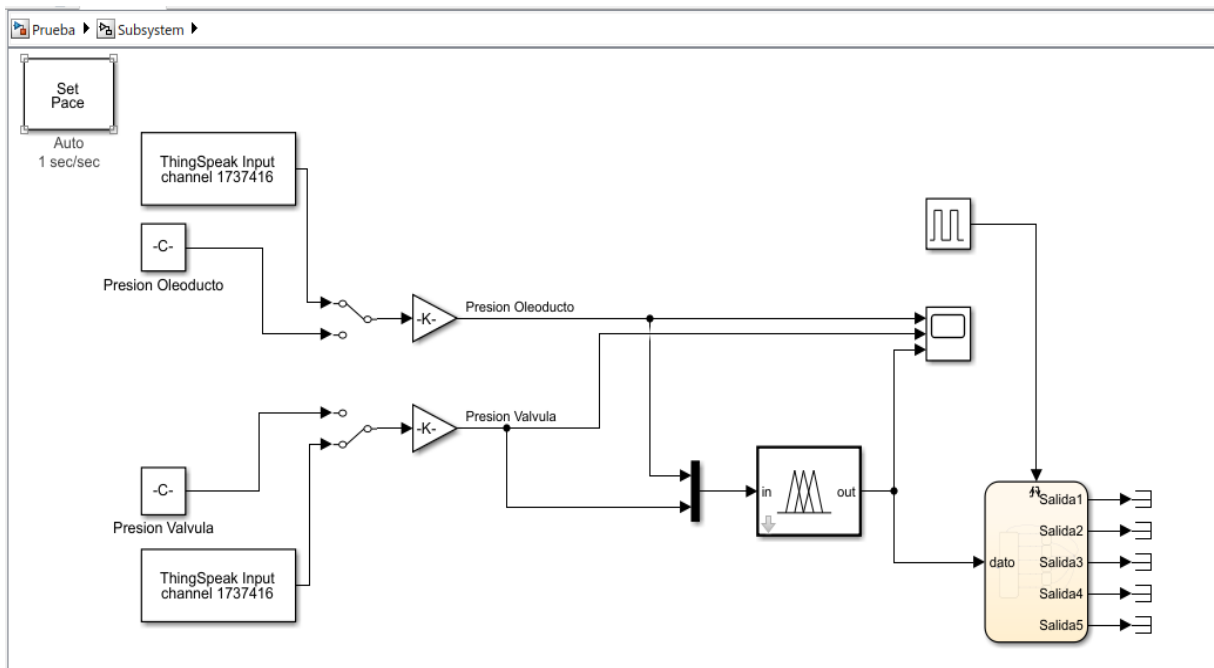


Procesamiento de datos en Simulink

En cuanto a la programación del sistema experto en el entorno de desarrollo *Simulink*, se realiza una combinación en la cual se obtienen los datos de la nube directamente de *ThingSpeak* y adicional se puede simular estos mismos datos para su validación y experimentación, para la visualización de las respuestas se complementa la lógica difusa con una máquina de estados, puesto que la combinación de los resultados de ambas variables lleva a un estado lógico de la válvula misma que describe cual es el problema al cual se enfrenta el operador de la planta de bombeo Shushufindi.

Figura 18

Programa en Simulink

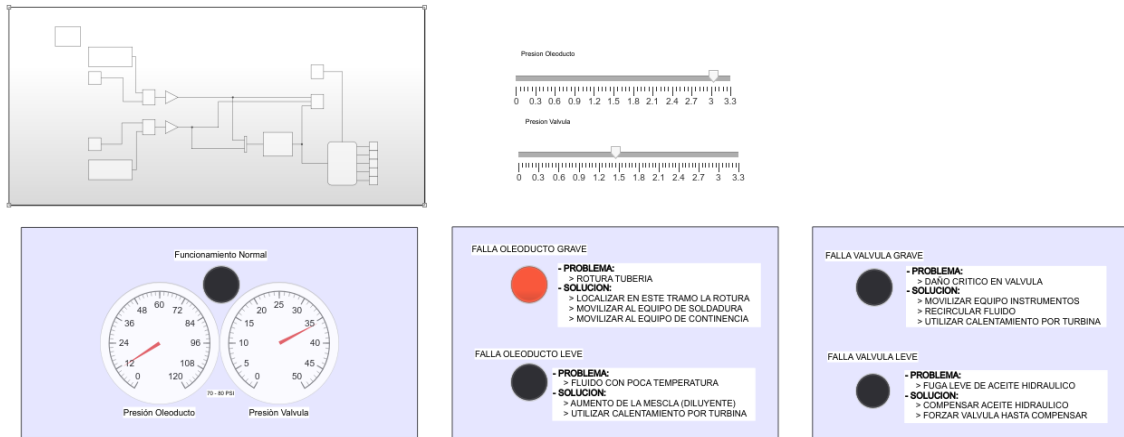


Nota. Para la lectura de datos desde la nube, se utiliza las credenciales de ThingSpeak

En el gráfico se muestra el programa realizado en *Simulink* el mismo se ejecuta en tiempo real para obtener los datos provenientes de la nube, los cuales son procesados para obtener primero el lugar donde ocurre el evento, segundo observa cual es la causa del evento y tercero obtener una posible solución. como se muestra en la gráfica 19.

Figura 19

Programa completo desarrollado en Simulink.



En la pantalla se puede observar las variables de entrada y cada indicador luminoso el mismo que representa un fallo dependiendo de su afectación tanto en el oleoducto como en la válvula de seguridad, se determina de la siguiente forma, naranja para casos leves y rojo para casos graves, el color verde representa que se encuentra en condiciones de operación normales.

Estrategias y/o técnicas

El desarrollo del Proyecto se lo dividió en 3 etapas, siendo la primera las entrevistas personales realizadas al personal que labora en la estación de bombeo Shushufindi con la finalidad de estructurar los conjuntos difusos que se utilizaron en el modelamiento del sistema experto, las mismas que se encuentran en el Anexo 1.

La segunda etapa fue el desarrollo del programa tanto en la plataforma *Node Red* de *Raspberry Pi*, como en el entorno gráfico de programación *Simulink* donde se comprobó la transmisión y recepción de datos mediante computación en la nube, esto gracias a la plataforma *ThingSpeak*.

Por último, se realizó la etapa de simulación con la unión de todo el proceso, es decir se enviaban datos desde la *Raspberry Pi* y se las procesaba en otra computadora mediante *Simulink* y a la par se los valida mediante la observación de los expertos en lógica difusa.

En cuanto a las herramientas tecnológicas que se emplearon para el desarrollo del presente proyecto se utilizó *Simulink* de *Matlab* puesto que es un entorno gráfico de programación y simulación basado en diagramas de bloque de modelos multidominio sin la utilización de

código escrito, se escogió esta herramienta por que la simulación es la más parecida a la implementación en el hardware dando mucha confianza en el momento del diseño.

Como se maneja por diagramas de bloques, estos son muy intuitivos y fáciles de leer, configurar lo que facilita el proceso de desarrollo, en especial con los bloques de lógica difusa e inteligencia artificial, pudiendo aplicarse en diferentes proyectos y gracias a su poder de escalabilidad se puede tener el control de un sistema completo.

Validación de la propuesta

En cuanto a la validación del proyecto sistema experto para supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa, se realiza las simulaciones en el laboratorio de mecatrónica de la universidad tecnológica equinoccial, donde los profesores son expertos en simulaciones de *Simulink* y lógica difusa, con lo cual la base del conocimiento fue revisada acorde a los parámetros presentados en el documento que reposa en el Anexo 3.

Tabla 2

Descripción de perfil de validadores

Nombres / Apellidos	Años de experiencia	Titulación Académica	Cargo
Félix Vladimir Bonilla Venegas	16 años de experiencia docente 5 años de experiencia laboral	Doctor en ciencias técnicas	Director de la Carrera de Mecatrónica de la universidad tecnológica equinoccial
Guillermo Alfredo Mosquera Canchingre	7 años de experiencia en docencia universitaria	Master of Science in Mechatronics	Profesor titular en la carrera de mecatrónica para la universidad tecnológica equinoccial
Nelson Ramiro Gutiérrez Suquillo	7 años experiencia en docencia	Maestría energías renovables y sostenibilidad energética	Docente FCII en la Carrera Mecatrónica para la universidad tecnológica equinoccial
Raul Enrique Pruna Panchi	10 años de experiencia en la industria petrolera	Máster universitario en industria 4.0 Magister en gestión de energías	Operador de producción y well pads en la empresa Repsol-Petrolia

En la Tabla a continuación presentada se muestra la valoración de criterios de los especialistas. Las valoraciones completas se hallan en el Anexo 3

Tabla 3

Evaluación de criterios de cuatro especialistas

EVALUACIÓN SEGÚN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD					
ESPECIALISTA: Félix Vladimir Bonilla Venegas					
Criterios	En total desacuerdo	En desacuerdo	Ni en acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	En total Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad				X	
Calidad técnica					X
Factibilidad					X
Pertinencia					X
ESPECIALISTA: Guillermo Alfredo Mosquera Canchingre					
Criterios	En total desacuerdo	En desacuerdo	Ni en acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	En total Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad					X
Calidad técnica					X
Factibilidad					X
Pertinencia					X
ESPECIALISTA: Nelson Ramiro Gutiérrez Suquillo					
Criterios	En total desacuerdo	En desacuerdo	Ni en acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	En total Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad				X	
Calidad técnica					X

Factibilidad				X	
Pertinencia					X
ESPECIALISTA: Raul Enrique Pruna Panchi					
Criterios	En total desacuerdo	En desacuerdo	Ni en acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	En total Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad					X
Calidad técnica					X
Factibilidad					X
Pertinencia					X

2.3 Matriz de articulación de la propuesta

En la presente matriz se sintetiza la articulación del producto realizado con los sustentos teóricos, metodológicos, estratégicos-técnicos y tecnológicos empleados.

Tabla 4

Matriz de articulación

Ejes o partes principales del proyecto		Breve descripción de los resultados de cada parte	Sustento teórico que se aplicó en la construcción del proyecto	Metodologías, herramientas técnicas y tecnológicas que se emplearon
1	Definición de las variables de entrada a monitorear y variables de salida a controlar.	1.1. Establecer el software y el hardware empleados en el proyecto de bajo costo 1.2. Comparación de proformas de los elementos seleccionados 1.3. Adquisición del hardware	Sistemas Expertos Lógica difusa Comunicación Inalámbrica Computación en la nube	- Revisión bibliográfica. - Revisión de sitios web oficiales de empresas desarrolladoras del hardware - Revisión de sitios web oficiales del software - Entrevistas personales con operadores para recolectar información
2	- Diseño de circuito electrónico - Programación de aplicación en entornos gráficos	2.1. Tarjeta electrónica basada en Raspberry pi 2.2. Programación de Node Red en Raspberry pi 2.3. Configuración de plataforma virtual ThingSpeak 2.4 Programación del sistema experto en Simulink	- Programación Node Red - Protocolo comunicación MQTT - Programación de bloques Simulink Matlab	- Sistema operativo Raspbian ejecuta la herramienta gráfica para la programación en Node red donde las librerías ThingspeakSendSimple ocupa el protocolo MQTT para el envío de datos a la nube - Toolkit Fuzzy Logic Controller de Simulink
3	Implementación: - Conexión remota - Enlace Node-Red - Simulación en entornos controlados - Aplicación	3.1 Conexiones físicas de dispositivos electrónicos. 3.2. Integración de software y hardware de la aplicación. 3.3. Conexión Remota 3.4. Panel de monitoreo de válvulas con respuesta predefinida ante una falla.	- Electrónica digital - Sistemas de comunicaciones - Dirección del Protocolo de Internet	- Manuales técnicos de los dispositivos. - Servicio de internet. - Programación en Matlab

2.4 Análisis de resultados. Presentación y discusión.

Durante el desarrollo del prototipo para la obtención de datos se realiza un circuito sencillo en un *protoboard* para la simulación de señales provenientes de la presión del oleoducto y la presión del aceite hidráulico de la válvula de seguridad, gracias al módulo de conversión de señales analógicas a digitales *ADS-1115*.

Para fines de prueba se conectan los periféricos necesarios para el control de la *Raspberry Pi*, estos son un teclado, mouse y monitor, los mismos no serán necesarios cuando se encuentre trabajando el prototipo en campo, ya que la configuración inicial explicada en el apartado anterior inicia el programa automáticamente al encender o reiniciar la *Raspberry Pi*, un indicativo visual de color azul muestra cuando se está ejecutando el programa y transmite los datos de las variables de presión.

Figura 20

Prototipo Armado.



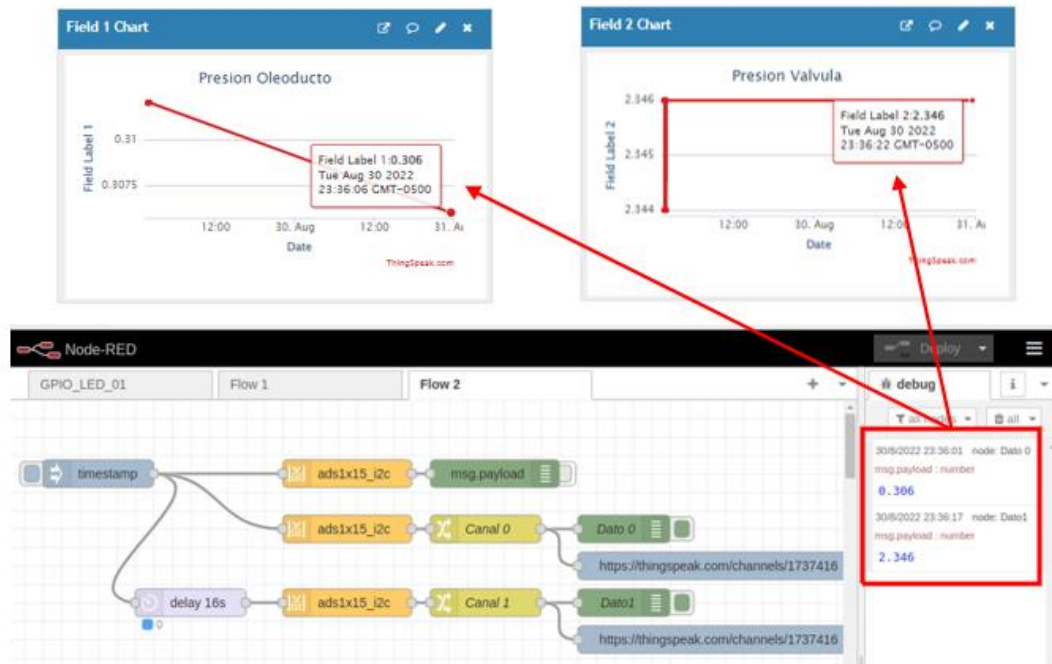
Nota. La fuente de alimentación para la *Raspberry Pi* es de 5 voltios 3 amperios, y los pines de entrada y salida aceptan un voltaje máximo de 3.3 voltios a 16 mili Amperios.

Una vez corroborado la comunicación entre la *Raspberry Pi* y el mundo exterior procedemos a comprobar la lectura del voltaje en el programa realizado en *Node Red*, el mismo que debe oscilar entre 0 y 3.3 voltios, estos valores son enviados a la nube cada 15

segundos para poderlos ver en la plataforma *ThingSpeak* comprobamos que los datos tanto en *Node Red* y *ThingSpeak* son los mismos manteniendo una comunicación estable y fluida entre la plataforma y el prototipo que recolecta la información de las variables.

Figura 21

Comprobación de comunicación entre Raspberry Pi y ThingSpeak



Como se observa se puede evidenciar que existe una relación en el tiempo de envío y el tiempo de recepción de los datos en ambas plataformas con lo que se comprueba la conexión entre las plataformas, con lo que se concluye las pruebas de la primera etapa del desarrollo del sistema experto.

La segunda etapa de las pruebas fue en la estación de bombeo Shushufindi la cual se representa mediante otra computadora que tienen instalado el software Matlab y ejecuta el programa que toma los datos en tiempo real para ser transformados mediante arreglos matemáticos en los bloques gráficos a presiones en rangos de PSI

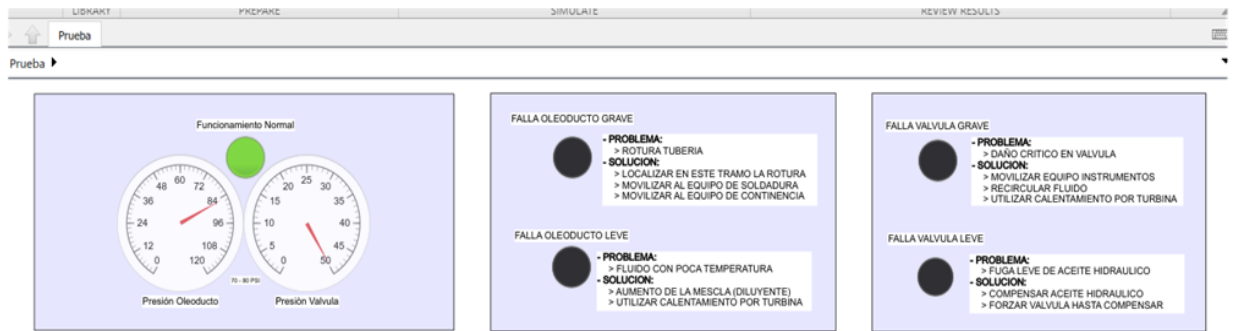
Para la presión obtenida del oleoducto se maneja un rango de 0 a 120 PSI

Para la presión del aceite hidráulico en la válvula de seguridad va de 0 a 50 PSI

Una vez comprobado que los valores de presiones son coherentes, pasan a ser procesados por la lógica difusa y la máquina de estados, con lo cual se obtiene la activación de indicadores visuales los cuales mediante el código de colores mencionado anteriormente representa el tipo de falla y la solución que se debe emplear.

Figura 22

Pantalla de monitoreo remoto en Simulink



Para verificar todas las soluciones, se envían datos de falla, las cuales se pueden observar en la tabla 5, y se comprueba la correlación con las fallas descritas en el programa y sus soluciones.

Tabla 5

Datos de falla

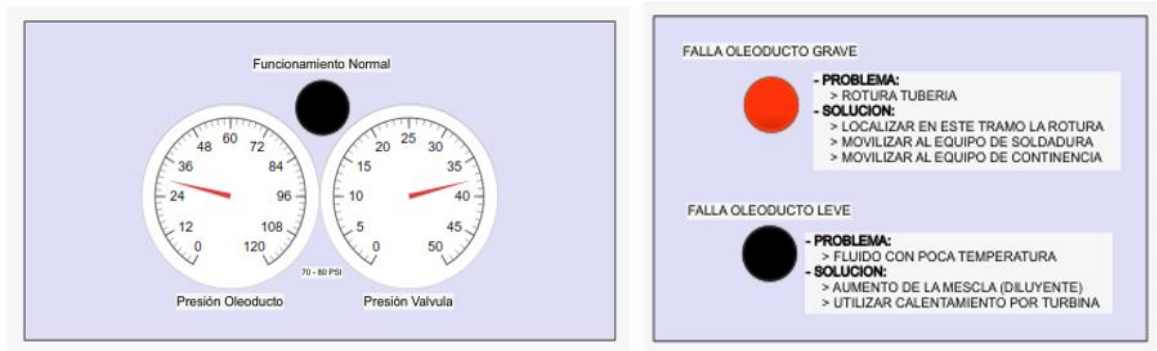
Presión Oleoducto (Psi)	Presión Válvula (Psi)	Condición
70 a 84	50	Operación normal
> 84	< 50	Falla leve del oleoducto
< 36	< 35	Falla grave del oleoducto
> 86	< 40	Falla leve de la válvula
> 96	< 20	Falla grave de la válvula

Con los datos de prueba se comprueba la respuesta del sistema experto, obteniendo resultados positivos ante fallas que puedan ocasionarse a lo largo del oleoducto, pudiendo identificar de dónde viene la falla y cuáles son las medidas a tomar.

Finalmente se toma un ejemplo de las pruebas para ser presentadas en el presente documento de investigación, siempre partiendo del estado o condición “operación normal”, la cual es representada por el indicador color verde, enviamos los datos de falla grave del oleoducto, la rotura del oleoducto es muy peligrosa para el ecosistema y las comunidades a su alrededor, por lo una respuesta oportuna y ágil en un tiempo reducido sería el éxito de las maniobras primarias de contención de un derrame de crudo, para poder observar todas las respuestas del sistema experto véase el Anexo 6.

Figura 23

Falla grave del oleoducto



Validación con expertos

Se presentan los resultados de la validación realizados por los cuatro especialistas en el tema, las pruebas se las realizó en los laboratorios de la universidad tecnológica equinoccial UTE, donde el modelo fue evaluado bajo los criterios técnicos que describe la universidad Israel para este proceso, obteniendo un rango de totalmente de satisfactorio y sobresaliente, lo cual significa que se cumple con todos los objetivos planteados al principio de este documento.

El trabajo de investigación obtuvo una calificación de 4 sobre 4 en todos los apartados planteados en los documentos de validación siendo el proyecto de monitoreo remoto basado en sistemas expertos muy factible de una buena calidad técnica con una temática adecuada y actual.

CONCLUSIONES

A raíz de los datos recolectados de las encuestas aplicadas al personal que trabaja en la estación de bombeo Shushufindi, se logró construir tanto la base del conocimiento del sistema experto como los conjuntos difusos que ayudaron al procesamiento de las variables que intervienen en el proceso de transporte de crudo, logrando de esta manera identificar las fallas; y mediante una interfaz gráfica proponer soluciones adecuadas cuando ocurre un evento no deseado en algún tramo del oleoducto.

Uno de los equipos de bajo costo y grandes prestaciones en el mundo del IoT es sin duda la Raspberry Pi por su gran versatilidad debido a su sistema operativo de código abierto permitió realizar la transmisión de datos desde un punto geográfico remoto sin dificultad y con base a

los criterios técnicos presentes en el sitio, logrando una conectividad estable con la plataforma ThingSpeak sin pérdida de datos entre muestreos de las variables implicadas.

Las nuevas tecnologías aplicadas a la industria como el IoT ofrecen un cambio en la manera como se manejan y mantienen los equipos proporcionando una visión más amplia de la forma como se manejan los problemas, es así que el monitoreo remoto de equipos que se encuentran en locaciones distantes cumple un papel fundamental cuando ocurre un fallo, en consecuencia, el resultado fue identificar el momento exacto que una válvula de seguridad actuó con lo cual reducimos el tiempo de respuesta.

Se logró el desarrollo de un prototipo experimental el cual responde con las necesidades técnicas para la simulación en espacios controlados con señales provistas analógicamente, dando como resultado la ágil toma de decisiones gracias al procesamiento de los datos con sistemas expertos mediante el uso de lógica difusa.

Según los datos obtenidos en las pruebas de validación realizadas en el laboratorio al sistema experto, se concluye que de implementarse el prototipo en las válvulas de seguridad a lo largo del oleoducto se llegaría a disminuir el tiempo de respuesta, por la identificación oportuna del tramo afectado en el momento justo que ocurra un derrame de crudo con ello se disminuye el impacto ambiental.

Las encuestas son una herramienta muy útil al momento de recabar información, por tal razón se logró condensar la información técnica y basto conocimiento empírico de los operadores en soluciones ágiles y de rápida implementación para los cuatro tipos de fallas que se determinaron tanto para el oleoducto como para la válvula de seguridad.

El sistema al cual se le aplica el monitoreo remoto es de difícil modelación al ser fluidos y al estar en un entorno impredecible puesto que podrían ser afectados por la mano del hombre o por fallos imprevistos de componentes mecánicos presentes en las válvulas de seguridad, por tales motivos se logró desarrollar el control mediante lógica difusa gracias a su metodología parecida al razonamiento humano de rápida implementación ya que no se utilizaron ecuaciones matemáticas complejas.

RECOMENDACIONES

El almacenamiento de los datos conlleva la creación de un historial muy detallado, que con el paso del tiempo se podrá migrar a un sistema basado en inteligencia artificial, con lo cual se controlaría un gran número de maquinaria industrial, para la predicción de fallos en equipos de similares características.

Una implementación a futuro del equipo desarrollado en el laboratorio sería el siguiente paso puesto que el mismo cuenta con todas las garantías teóricas y técnicas para un buen funcionamiento en campo, por su fácil instalación y bajo requerimiento energético podría ser montado con la ayuda de sistemas fotovoltaicos en el caso de que las locaciones no tengan energía eléctrica.

Las industrias están migrando a una tecnología de hiperconexión por tal razón en el futuro se podría contemplar la posibilidad de embeber todo el sistema directamente en la Raspberry Pi con lo cual la portabilidad del dispositivo crecería y dejaría de depender de una computadora externa procesando las señales en el mismo sitio.

Con la ayuda de plataformas digitales de almacenamiento y visualización de datos en la nube se podría monitorear y recibir alarmas tempranas en cualquier lugar del mundo, cuando ocurran desviaciones en los datos almacenados localmente de las variables de presión logrando así una herramienta de hiperconexión muy poderosa y confiable.

El retardo que existe en cuanto a la transmisión de datos, se la puede mejorar si se utiliza una plataforma desarrollada de forma local y de uso exclusivo, teniendo como ventaja un mayor volumen de datos a ser analizados mejorando la precisión de los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, Y., Sosa, S., Galindo, J., Morales, A., Gallardo, R., & Villaseñor, I. (2020, octubre 15). *Diseño y desarrollo de un sistema de monitoreo remoto implementando internet de las cosas*. Research in Computing Science. Retrieved August 22, 2022, from https://rcs.cic.ipn.mx/2020_149_11/Diseno%20y%20desarrollo%20de%20un%20sistema%20de%20monitoreo%20remoto%20implementando%20internet%20de%20las%20Ocosas.pdf
- Andrés, J., Rosales, J., & Guido, A. (2019, octubre 30). *Desarrollo de un sistema electrónico configurable de monitoreo remoto de PH, presión y temperatura utilizando un computador de placa reducida para el biorreactor del laboratorio de investigación de Ingeniería Industrial de la Universidad de San Martín de*. Repositorio USMP. Retrieved August 22, 2022, from <https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/5429>
- Gómez, J., Regino, F., & Espinel, E. (2019, octubre 20). Diseño de un Sistema Difuso para la Detección y Ubicación de Fugas en Tuberías Horizontales. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação, E(25)*, 277 - 290. <https://www.proquest.com/openview/c7c1a0733c9c98a787061b4c36bc403d/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1006393>
- Jiménez, L. (2020, agosto). IMPACTO DE LA INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA EN LA ACTUALIDAD. *Convergence Tech, IV(4)*, 59-68. https://www.researchgate.net/profile/Ledys-Jimenez/publication/352750927_IMPACTO_DE_LA_INVESTIGACION_CUANTITATIVA_EN_LA_ACTUALIDAD/links/60d66a7b299bf1ea9e5113/IMPACTO-DE-LA-INVESTIGACION-CUANTITATIVA-EN-LA-ACTUALIDAD.pdf

- Kouro, S., & Musalem, R. (2019). *Control Mediante Lógica Difusa*. Ramos Departamento de Electrónica. Retrieved August 24, 2022, from <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo377/documentos/Fuzzy.pdf>
- López, J. (2018). *Diseño de un sistema experto para optimizar la operación de los espesadores de relaves de alta capacidad en una planta concentradora de cobre*. Repositorio UNSA. Retrieved August 23, 2022, from <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/6122/IElocuoj.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mathivet, V. (2018). *Inteligencia artificial para desarrolladores: conceptos e implementación en C#*. Ediciones Eni.
- Mell, P., & Grance, T. (2021). *The NIST definition of cloud computing: Recommendations of the*. U. S. Department of Commerce.
- Molina, C., & Hurtado, Á. (2019, septiembre). *Modelo de lógica difusa para pronosticar la inflación en Colombia*. Repositorio Institucional Universidad EAFIT. Retrieved August 24, 2022, from <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/15872>
- Niño, L. (2021, December 15). *Modelo de adquisición de datos para el monitoreo de activos mantenibles a través de un sistema de información | Documentos de Trabajo ECBTI*. Hemeroteca UNAD. Retrieved August 21, 2022, from <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/wpecbti/article/view/5571>
- Ortiz, J. (2021, abril). *Desarrollo de un prototipo de un sistema de riego automatizado para el procesamiento, monitoreo y análisis de datos utilizando lógica difusa en tiempo real e IoT para optimizar el uso de agua aplicada en el cultivo*. Repositorio UPS. Retrieved August 21, 2022, from <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20299>
- Petroecuador. (2019, Febrero 12). *El SOTE, 46 años transportando el crudo amazónico – EP PETROECUADOR*. EP PETROECUADOR. Retrieved Agosto 21, 2022, from <https://www.eppetroecuador.ec/?p=6845>

- Ramírez, J. F. (2019, abril 30). *ESTADO DEL ARTE DEL APRENDIZAJE AUTOMATICO RELACIONADO CON LA LOGICA DIFUSA*. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO.
- Retrieved August 24, 2022, from <http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/5580/Informe%20Final-Ramirez%20Veliz-FIIS-2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ramirez, M., Macias, I., & Ibañez, K. (2019). Industria 4.0 fundamentos y sus alcances en el sistema eléctrico. *Repositorio Tecnológico de Monterey*.
- Ríos Insua, D., & Gómez-Ullate Oteiza, D. (2019). *Big data: Conceptos, tecnologías y aplicaciones*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Rozo, F. (2020). Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0. *Revista UIS Ingenierías*, 19(2), 177-191.
- <https://www.redalyc.org/journal/5537/553768132019/553768132019.pdf>
- Sánchez, M., & Vargas, J. (2018). *Diseño de un Sistema de Radioenlaces Redundantes y de Alta Disponibilidad para transmitir información de los Sistemas de Detección de Fugas de Oleoductos, SCADA y Videovigilancia de las estaciones de la refinería Talara en el Departamento de Piura*. Repositorio Institucional UNPRG. Retrieved August 21, 2022, from <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/2017>
- Schmuller, J. (2019). *Aprendiendo UML*. Prentice Hall.
- VERA, B. A. (2021). *IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA EXPERTO BASADO EN REGLAS PARA LA GESTIÓN Y CONTROL DE INVENTARIO EN EL LOCAL "MULTIMARCA 2" DEL CANTÓN JIPIJAPA*. UNIVERSIDAD ESTATAL DEL SUR DE MANABÍ. Retrieved August 23, 2022, from <http://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/3067/1/TESIS%20DE%20-%20VERA%20ZAMBRANO%20BRYAN%20ALEXIS.pdf>
- Zerpa, H., Becerra, C., Izquierdo, H., & Ramos, A. (2018). Herramienta web para el desarrollo ágil de Sistemas Expertos. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 3(03), 76-85.

ANEXOS

ANEXO 1

ENCUESTAS REALIZADAS A LOS OPERADORES DE LA PLANTA DE BOMBEO SHUSHUFINDI



Universidad
Israel

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL
ESCUELA DE POSGRADOS "ESPOG"

MAESTRÍA EN
MENCIÓN: ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
Resolución: RPC-SO-09-No.265-2021

Instrumento encuesta personal

Objetivo general del proyecto de investigación: Desarrollar un sistema experto para la supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa.

Datos del Experto Operador estación de bombeo Shushufindi:

Nombres y Apellidos: Italo Rötman Aribe Vargas

Años de experiencia: 18 años

1) Con respecto a los parámetros seguros de operación del oleoducto determine los valores de presión (PSI) dependiendo su experiencia.

Rango de operación del oleoducto 0 - 1500

Presión Normal de operación 700 - 800

Presión alta de operación 800 - 900

Presión muy alta de operación 950 - 1100

Presión baja de operación ~~100~~ - 700 - 50

Presión muy baja de operación 50 - 100

2) Con respecto a los parámetros seguros de operación de la válvula de seguridad determine los valores de presión (PSI) dependiendo su experiencia.

Rango de operación de la válvula de seguridad 0 - 50

Presión Normal de operación 30

Presión baja de operación 45 - 30

Presión muy baja de operación 25 - 10

3) Detalle las fallas leves del oleoducto

crudo con poca temperatura

presurización en la línea

4) Detalle las fallas graves del oleoducto

retorno

falta de presión

5) Detalle las fallas leves de la válvula de seguridad

Fuga del hidráulico

6) Detalle las fallas graves de la válvula de seguridad

Cierre brusco de la válvula

7) Detalle las soluciones para corregir las fallas leves del oleoducto

prender turbinas
controlar mescla diluyente

8) Detalle las soluciones para corregir las graves del oleoducto

parar el bombeo
identificar el pittin
movilizar soldadores

9) Detalle las soluciones para corregir las fallas leves de la válvula de seguridad

movilizar instrumentista para forzar la válvula

10) Detalle las soluciones para corregir las fallas graves de la válvula de seguridad

lo mismo
cambio válvula

Firma:





Universidad
Israel

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL
ESCUELA DE POSGRADOS "ESPOG"

MAESTRÍA EN
MENCIÓN: ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
Resolución: RPC-SO-09-No.265-2021

Instrumento encuesta personal

Objetivo general del proyecto de investigación: Desarrollar un sistema experto para la supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa.

Datos del Experto Operador estación de bombeo Shushufindi:

Nombres y Apellidos: LENIN EMILIANO CALCEDO TOLIMA
Años de experiencia: 13 años

- 1) Con respecto a los parámetros seguros de operación del oleoducto determine los valores de presión (PSI) dependiendo su experiencia.

Rango de operación del oleoducto 0 - 1200
Presión Normal de operación 650 / 750
Presión alta de operación 800 / 1000
Presión muy alta de operación 1000 / 1200
Presión baja de operación 650 / 500
Presión muy baja de operación 500 / 0

- 2) Con respecto a los parámetros seguros de operación de la válvula de seguridad determine los valores de presión (PSI) dependiendo su experiencia.

Rango de operación de la válvula de seguridad 0 - 50
Presión Normal de operación 45 - 50
Presión baja de operación 40 - 20
Presión muy baja de operación 10 - 0

- 3) Detalle las fallas leves del oleoducto

baja temperatura en el oleoducto

- 4) Detalle las fallas graves del oleoducto

rotura del oleoducto por perforación

5) Detalle las fallas leves de la válvula de seguridad

fuga del aceite hidráulico

6) Detalle las fallas graves de la válvula de seguridad

daño del mecanismo interno de la válvula

7) Detalle las soluciones para corregir las fallas leves del oleoducto

reparar el acerto con la toralima

8) Detalle las soluciones para corregir las graves del oleoducto

poner el bridas

9) Detalle las soluciones para corregir las fallas leves de la válvula de seguridad

limpiar la válvula

10) Detalle las soluciones para corregir las fallas graves de la válvula de seguridad

limpiar la válvula

Firma:





Universidad
Israel

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL
ESCUELA DE POSGRADOS "ESPOG"

MAESTRÍA EN
MENCIÓN: ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
Resolución: RPC-SO-09-No.265-2021

Instrumento encuesta personal

Objetivo general del proyecto de investigación: Desarrollar un sistema experto para la supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa.

Datos del Experto Operador estación de bombeo Shushufindi:

Nombres y Apellidos: Telmo Vinicio Velasco Almbita
Años de experiencia: 10 años

- 1) Con respecto a los parámetros seguros de operación del oleoducto determine los valores de presión (PSI) dependiendo su experiencia.

Rango de operación del oleoducto 0 - 1100

Presión Normal de operación 700 - 850

Presión alta de operación 850 - 1000

Presión muy alta de operación 1000 - 1200

Presión baja de operación 700 - 500

Presión muy baja de operación 450 - 100

- 2) Con respecto a los parámetros seguros de operación de la válvula de seguridad determine los valores de presión (PSI) dependiendo su experiencia.

Rango de operación de la válvula de seguridad 0 - 50

Presión Normal de operación 50

Presión baja de operación 45 - 20

Presión muy baja de operación 10 - 0

- 3) Detalle las fallas leves del oleoducto

Deflexión por sobre presión
Plataformas o corrosiones por el ser humano
Corte por herramientas como motosierras

- 4) Detalle las fallas graves del oleoducto

Procesamiento por falta de temperatura

5) Detalle las fallas leves de la válvula de seguridad

Fuga aceite hidráulico

6) Detalle las fallas graves de la válvula de seguridad

Difecto Mecanismo

7) Detalle las soluciones para corregir las fallas leves del oleoducto

Aumentar Reservas cuando sea necesario
Calentamiento controlado

8) Detalle las soluciones para corregir las graves del oleoducto

Calentamiento brusco
Calentamiento controlado del líquido

9) Detalle las soluciones para corregir las fallas leves de la válvula de seguridad

Compensar aceite hidráulico

10) Detalle las soluciones para corregir las fallas graves de la válvula de seguridad

Forzar válvula

Firma:





Universidad
Israel

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL
ESCUELA DE POSGRADOS "ESPOG"

MAESTRÍA EN
MENCIÓN: ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
Resolución: RPC-SO-09-No.265-2021

Instrumento encuesta personal

Objetivo general del proyecto de investigación: Desarrollar un sistema experto para la supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa.

Datos del Experto Operador estación de bombeo Shushufindi:

Nombres y Apellidos: Juan Carlos Parrodo Salazar
Años de experiencia: 15

1) Con respecto a los parámetros seguros de operación del oleoducto determine los valores de presión (PSI) dependiendo su experiencia.

Rango de operación del oleoducto 1200 MAX
Presión Normal de operación 700 a 800 PSI
Presión alta de operación 800 a 100
Presión muy alta de operación 100 a 1200
Presión baja de operación FLUJE 250-700
Presión muy baja de operación 20 PSI

2) Con respecto a los parámetros seguros de operación de la válvula de seguridad determine los valores de presión (PSI) dependiendo su experiencia.

Rango de operación de la válvula de seguridad 50 PSI MAX
Presión Normal de operación 50
Presión baja de operación 45
Presión muy baja de operación 10

3) Detalle las fallas leves del oleoducto

Grandes aumentos de presión en el tramo

4) Detalle las fallas graves del oleoducto

Quemado de soporte del oleoducto



5) Detalle las fallas leves de la válvula de seguridad

Cuando existe una fuga de refrigerante

6) Detalle las fallas graves de la válvula de seguridad

Cuando existe fuga más grande del aceite

7) Detalle las soluciones para corregir las fallas leves del oleoducto

poner en funcionamiento las Turbinas para disminuir la temperatura en el oleoducto

8) Detalle las soluciones para corregir las graves del oleoducto

reparar las bombas de la estación hasta identificar el aceite

9) Detalle las soluciones para corregir las fallas leves de la válvula de seguridad

se debe forzar la válvula

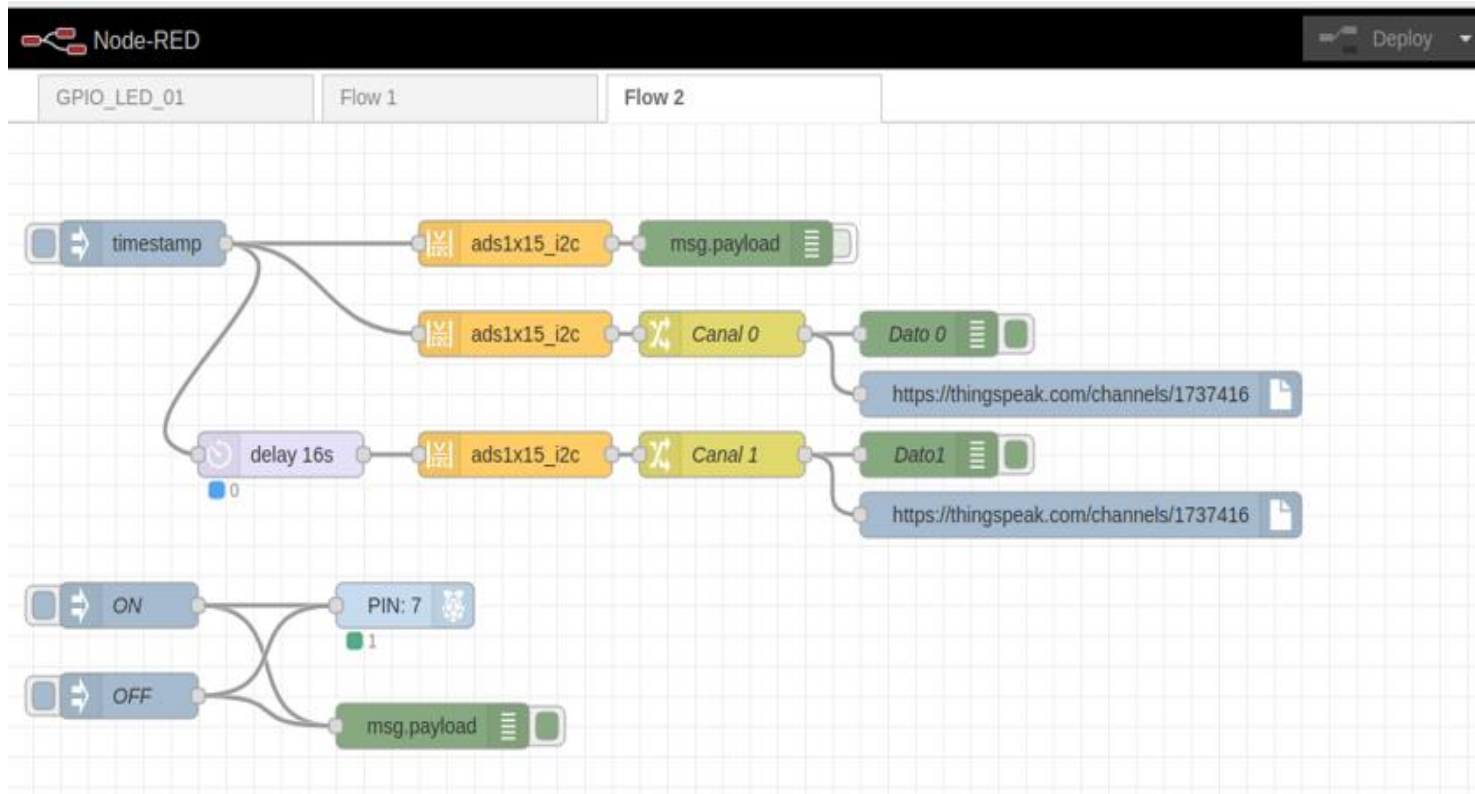
10) Detalle las soluciones para corregir las fallas graves de la válvula de seguridad

Forzar la válvula

Firma:

ANEXO 2

PROGRAMA COMPLETO NODE RED



ANEXO 3

INSTRUMENTO DE VALIDACIÓN POR ESPECIALISTAS



Yo, Félix Vladimir Bonilla Venegas, con C.I 1710300045, en mi calidad de validador de la propuesta del proyecto titulado: *Sistema experto para supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa.*

Elaborado por el Ing. Paúl Marcelo Jácome Espín, con C.I 0502924756, estudiante de la Maestría en Electrónica y automatización de la Universidad Tecnológica Israel (UISRAEL), como parte de los requisitos para obtener el Título de Magister, me permito declarar haber revisado el proyecto y realizado la evaluación de criterios.

Quito D.M., 01 de septiembre del 2022

Félix Vladimir Bonilla Venegas

C.I 1710300045

Registro SENESCYT 6431146288



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL
 ESCUELA DE POSGRADOS "ESPOB"

MAESTRÍA EN
 MENCIÓN: ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
 Resolución: RPC-SO-09-No.265-2021

Instrumento para la validación de la propuesta mediante criterio de un especialista

Objetivo general del proyecto de investigación: Desarrollar un sistema experto para la supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa.

Datos del Especialista:

Nombres y Apellidos: Félix Vladimir Bonilla Venegas

Años de experiencia: 16 años de experiencia docente y 5 años de experiencia laboral

Titulación académica: Doctor en ciencias técnicas

Cargo: Director de la Carrera de Mecatrónica en la universidad UTE

Valore cada criterio propuesto colocando una X, tomando en cuenta los criterios de evaluación:

Criterio	Descripción
Impacto	Aplicación práctica de la teoría en función de gestión y su representatividad en la generación de nuevo saber.
Aplicabilidad	La relevancia de implementar en un medio académico las técnicas aplicadas a proyectos de gestión.
Conceptualización	Los fundamentos de la propuesta deben ser claros, concisos y precisos para la gestión por medio de la manera sencilla y efectiva.
Actualidad	Los contenidos de la propuesta consideran los procedimientos actuales y los cambios científicos y tecnológicos más recientes en la línea de gestión.
Calidad Técnica	Mucho de los recursos tecnológicos del contenido de la propuesta.
Factibilidad	Debe justificarse el estudio a seguir por parte de la UTE.
Perfomancia	Los contenidos de la propuesta son relevantes, representativos y pertinentes para contribuir a la investigación planteada.

EVALUACIÓN SEGUN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD					
Criterio	No en absoluto de acuerdo	En desacuerdo	No en absoluto de acuerdo	De acuerdo	En Total Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad				X	
Calidad Técnica					X
Factibilidad					X
Perfomancia					X

Firma:



Yo, Guillermo Alfredo Mosquera Canchingre, con C.I 0802613059, en mi calidad de validador de la propuesta del proyecto titulado: *Sistema experto para supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa*.

Elaborado por el Ing. Paúl Marcelo Jácome Espín, con C.I 0502924756, estudiante de la Maestría en Electrónica y automatización de la Universidad Tecnológica Israel (UISRAEL), como parte de los requisitos para obtener el Título de Magister, me permito declarar haber revisado el proyecto y realizado la evaluación de criterios.

Quito D.M., 01 de septiembre del 2022

Guillermo Alfredo Mosquera Canchingre

C.I 0802613059

Registro SENESCYT 7977 R-15-21961



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL
ESCUELA DE POSGRADOS "ESPOG"**

**MAESTRÍA EN
MENCIÓN: ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**
Resolución: RPC-SO-09-No.265-2021

Instrumento para la validación de la propuesta mediante criterio de un especialista

Objetivo general del proyecto de investigación: Desarrollar un sistema experto para la supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa.

Datos del Especialista:

Nombres y Apellidos: Guillermo Alfredo Mosquera Canchingre

Años de experiencia: 7 años de experiencia como docente universitario

Titulación académica: Master of Science in Mechatronics

Cargo: Profesor titular en la carrera de mecatrónica en la universidad UTE

Valore cada criterio propuesto colocando una X, tomando en cuenta los criterios de evaluación.

Criterios	Descripción
Impacto	Representa el alcance que tendrá el modelo de gestión y su representatividad en la generación de valor público.
Aplicabilidad	La capacidad de implementación del modelo considerando que los contenidos de la propuesta sean aplicables.
Conceptualización	Los componentes de la propuesta tienen como base conceptos y teorías propias de la gestión por resultados de manera sistémica y articulada.
Actualidad	Los contenidos de la propuesta consideran los procedimientos actuales y los cambios científicos y tecnológicos que se producen en la nueva gestión pública.
Calidad Técnica	Miden los atributos cualitativos del contenido de la propuesta.
Factibilidad	Nivel de utilización del modelo propuesto por parte de la Entidad.
Pertinencia	Los contenidos de la propuesta son consuetos, convenientes y convenientes para solucionar el problema planteado.

EVALUACIÓN SEGÚN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD					
Criterios	En total desacuerdo	En desacuerdo	Ni en acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	En total Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad					X
Calidad técnica					X
Factibilidad					X
Pertinencia					X

Firma:



Yo, Nelson Ramiro Gutiérrez Suquillo, con C.I 1712465713, en mi calidad de validador de la propuesta del proyecto titulado: *Sistema experto para supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa.*

Elaborado por el Ing. Paúl Marcelo Jácome Espín, con C.I 0502924756, estudiante de la Maestría en Electrónica y automatización de la Universidad Tecnológica Israel (UISRAEL), como parte de los requisitos para obtener el Título de Magister, me permito declarar haber revisado el proyecto y realizado la evaluación de criterios.

Quito D.M., 01 de septiembre del 2022

Nelson Ramiro Gutiérrez Suquillo

C.I 1712465713

Registro SENESCYT 7474 R-15-23910



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL
ESCUELA DE POSGRADOS "ESPOG"

MAESTRÍA EN
MENCIÓN: ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
Resolución: RPC-SO-09-No.265-2021

Instrumento para la validación de la propuesta mediante criterio de un especialista

Objetivo general del proyecto de investigación: Desarrollar un sistema experto para la supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa.

Datos del Especialista:

Nombres y Apellidos: Nelson Ramiro Gutiérrez Suquillo

Años de experiencia: 7 años experiencia en docencia

Titulación académica: Maestría energías renovables y sostenibilidad energética

Cargo: Docente FCI en la Carrera de Mecatrónica en la universidad UTE

Valore cada criterio propuesto colocando una X, tomando en cuenta los criterios de evaluación.

Criterios	Descripción
Impacto	Representa el alcance que tendrá el modelo de gestión y su representatividad en la generación de valor público.
Aplicabilidad	La capacidad de implementación del modelo considerando que los contenidos de la propuesta sean aplicables.
Conceptualización	Los componentes de la propuesta tienen como base conceptos y teorías propias de la gestión por resultados de manera sistemática y articulada.
Actualidad	Los contenidos de la propuesta consideran los procedimientos actuales y los cambios científicos y tecnológicos que se producen en la nueva gestión pública.
Calidad Técnica	Miden los atributos cualitativos del contenido de la propuesta.
Factibilidad	Nivel de utilización del modelo propuesto por parte de la Entidad.
Pertinencia	Los contenidos de la propuesta son concordantes, convenientes y convenientes para solucionar el problema planteado.

EVALUACIÓN SEGÚN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD					
Criterios	En total desacuerdo	En desacuerdo	Ni en acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	En total Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad				X	
Calidad técnica					X
Factibilidad				X	
Pertinencia					X

Firma:



Yo, Raúl Enrique Pruna Panchi, con C.I 0503208258, en mi calidad de validador de la propuesta del proyecto titulado: *Sistema experto para supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa*.

Elaborado por el Ing. Paúl Marcelo Jácome Espín, con C.I 0502924756, estudiante de la Maestría en Electrónica y automatización de la Universidad Tecnológica Israel (UISRAEL), como parte de los requisitos para obtener el Título de Magister, me permito declarar haber revisado el proyecto y realizado la evaluación de criterios.

Quito D.M., 01 de septiembre del 2022

Raúl Enrique Pruna Panchi

C.I 0503208258

Registro SENESCYT 1020-2019-2037236



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL
ESCUELA DE POSGRADOS "ESPOG"**

**MAESTRÍA EN
MENCIÓN: ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
Resolución: RPC-SO-09-No.265-2021**

Instrumento para la validación de la propuesta mediante criterio de un especialista

Objetivo general del proyecto de investigación: Desarrollar un sistema experto para la supervisión y control de válvulas de seguridad de un oleoducto mediante lógica difusa.

Datos del Especialista:

Nombres y Apellidos: Raúl Enrique Pruna Panchi

Años de experiencia: 10 años experiencia en la industria petrolera

Titulación académica: Mater universitario en industria 4.0

Cargo: Operador de producción y well pads

Valore cada criterio propuesto colocando una X, tomando en cuenta los criterios de evaluación.

Criterios	Descripción
Impacto	Representa el alcance que tendrá el modelo de gestión y su representatividad en la generación de valor pública.
Aplicabilidad	La capacidad de implementación del modelo considerando que los contenidos de la propuesta sean aplicables.
Conceptualización	Los componentes de la propuesta tienen como base conceptos y teorías propias de la gestión por resultados de manera sistemática y articulada.
Actualidad	Los contenidos de la propuesta consideran los procedimientos actuales y los cambios científicos y tecnológicos que se producen en la nueva gestión pública.
Calidad Técnica	Miden los atributos cualitativos del contenido de la propuesta.
Factibilidad	Nivel de utilización del modelo propuesto por parte de la Entidad.
Pertinencia	Los contenidos de la propuesta son conducentes, convenientes y convenientes para solucionar el problema planteado.

EVALUACIÓN SEGÚN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD					
Criterios	En total desacuerdo	En desacuerdo	Ni en acuerdo, ni en desacuerdo	De acuerdo	En total Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad					X
Calidad técnica					X
Factibilidad					X
Pertinencia					X

Firma: 

ANEXO 4

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE RASPBERRY PI

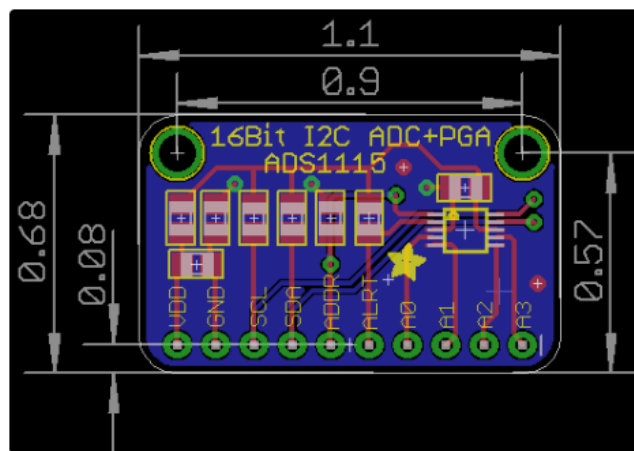
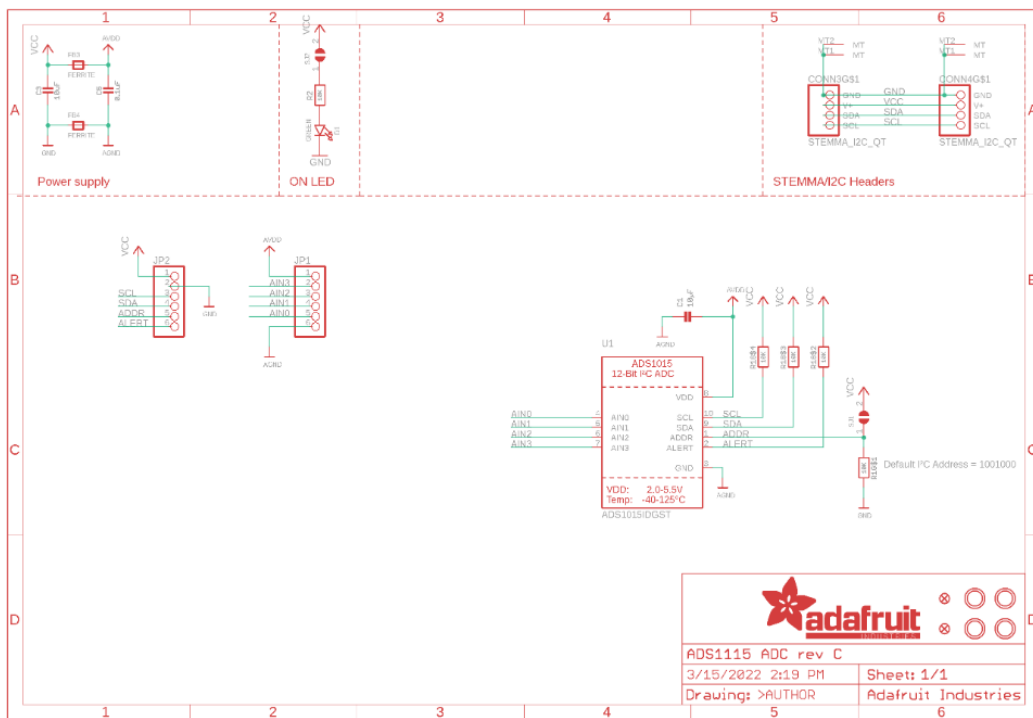
Specifications

Processor:	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 64-bit SoC @ 1.4 GHz
Memory:	1GB LPDDR2 SDRAM
Connectivity:	<ul style="list-style-type: none">■ 2.4 GHz and 5 GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 4.2, BLE■ Gigabit Ethernet over USB 2.0 (maximum throughput 300 Mbps)■ 4 × USB 2.0 ports
Access:	Extended 40-pin GPIO header
Video & sound:	<ul style="list-style-type: none">■ 1 × full size HDMI■ MIPI DSI display port■ MIPI CSI camera port■ 4 pole stereo output and composite video port
Multimedia:	H.264, MPEG-4 decode (1080p30); H.264 encode (1080p30); OpenGL ES 1.1, 2.0 graphics
SD card support:	Micro SD format for loading operating system and data storage
Input power:	<ul style="list-style-type: none">■ 5V/2.5A DC via micro USB connector■ 5V DC via GPIO header■ Power over Ethernet (PoE)–enabled (requires separate PoE HAT)
Environment:	Operating temperature, 0–50 °C
Compliance:	For a full list of local and regional product approvals, please visit www.raspberrypi.org/products/raspberrypi-3-model-b+
Production lifetime:	The Raspberry Pi 3 Model B+ will remain in production until at least January 2023.



ANEXO 5

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CONVERTOR ANALOGICO DIGITAL ADS-1115



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

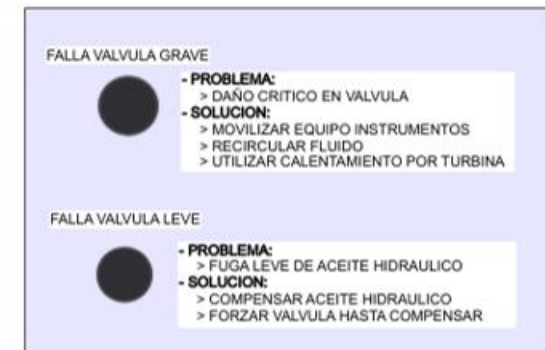
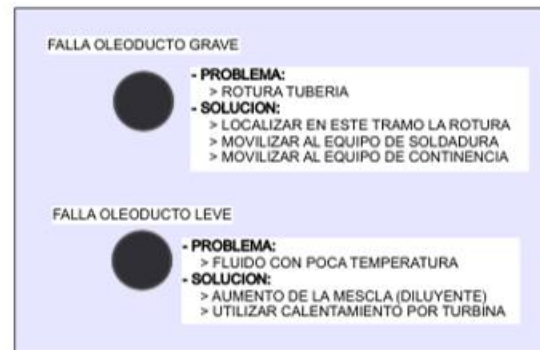
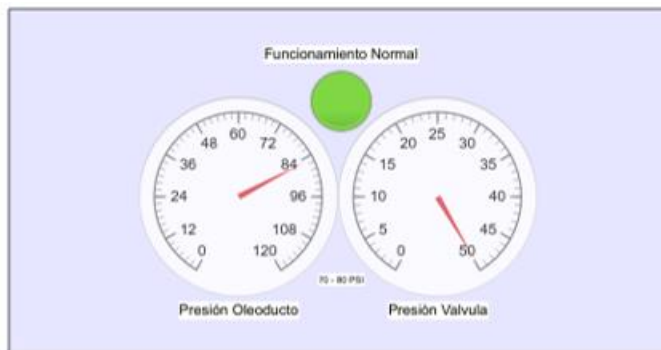
	ADS1113, ADS1114, ADS1115	UNIT
VDD to GND	-0.3 to +5.5	V
Analog input current	100, momentary	mA
Analog input current	10, continuous	mA
Analog input voltage to GND	-0.3 to VDD + 0.3	V
SDA, SCL, ADDR, ALERT/RDY voltage to GND	-0.5 to +5.5	V
Maximum junction temperature	+150	°C
Storage temperature range	-60 to +150	°C

(1) Stresses above those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. Exposure to absolute maximum conditions for extended periods may affect device reliability.

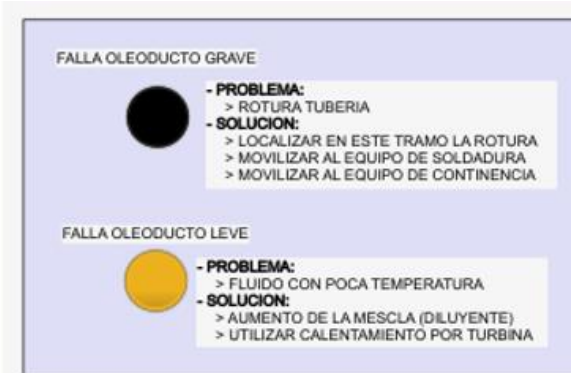
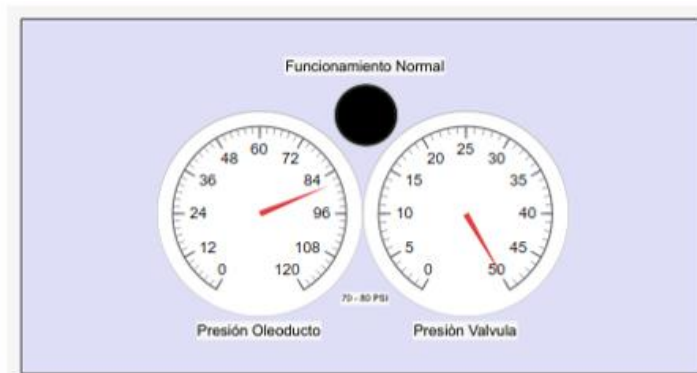
ANEXO 6

RESPUESTAS DEL SISTEMA EXPERTO

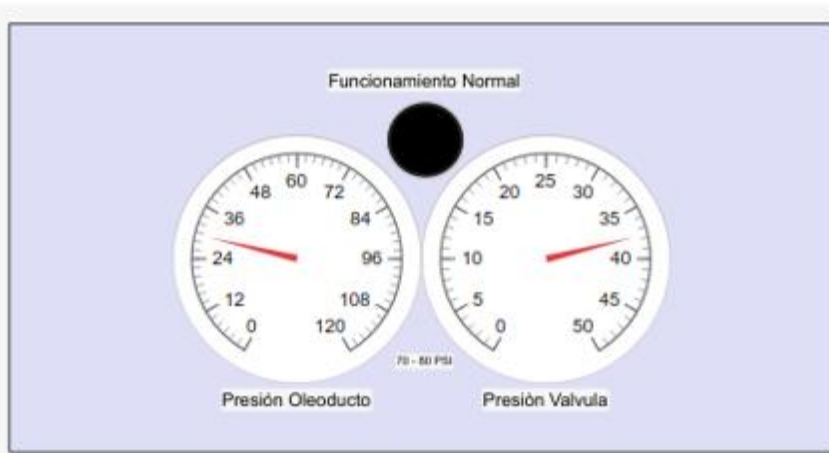
1) Sistema normal



2) Falla del oleoducto leve



3) Falla del oleoducto grave



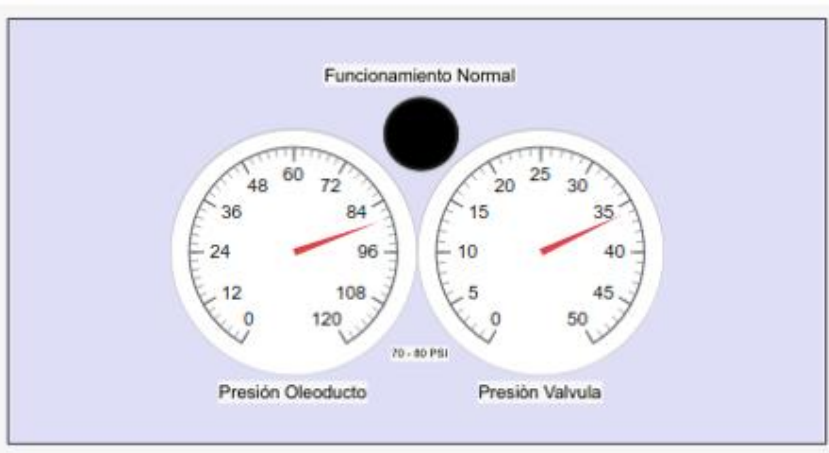
FALLA OLEODUCTO GRAVE

- **PROBLEMA:**
 - > ROTURA TUBERIA
- **SOLUCION:**
 - > LOCALIZAR EN ESTE TRAMO LA ROTURA
 - > MOVILIZAR AL EQUIPO DE SOLDADURA
 - > MOVILIZAR AL EQUIPO DE CONTINENCIA

FALLA OLEODUCTO LEVE

- **PROBLEMA:**
 - > FLUIDO CON POCA TEMPERATURA
- **SOLUCION:**
 - > AUMENTO DE LA MESCLA (DILUYENTE)
 - > UTILIZAR CALENTAMIENTO POR TURBINA

4) Falla de la válvula de seguridad leve



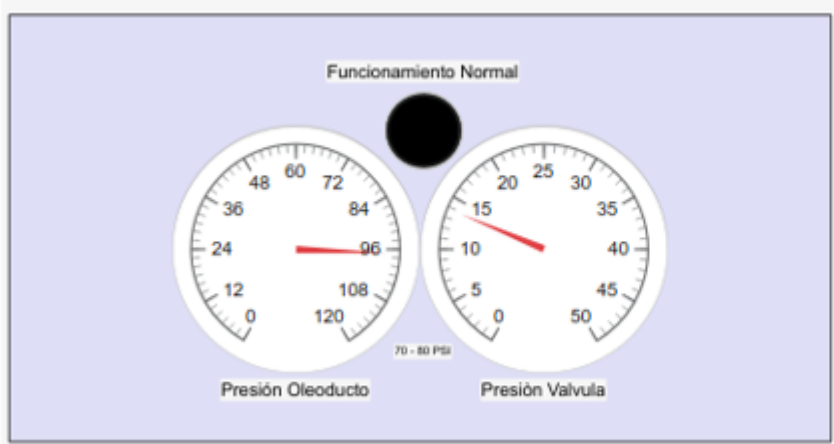
FALLA VALVULA GRAVE

- **PROBLEMA:**
 - > DAÑO CRITICO EN VALVULA
- **SOLUCION:**
 - > MOVILIZAR EQUIPO INSTRUMENTOS
 - > RECIRCULAR FLUIDO
 - > UTILIZAR CALENTAMIENTO POR TURBINA

FALLA VALVULA LEVE

- **PROBLEMA:**
 - > FUGA LEVE DE ACEITE HIDRAULICO
- **SOLUCION:**
 - > COMPENSAR ACEITE HIDRAULICO
 - > FORZAR VALVULA HASTA COMPENSAR

5) Falla de la válvula de seguridad grave



FALLA VALVULA GRAVE



- **PROBLEMA:**
 - > DAÑO CRITICO EN VALVULA
- **SOLUCION:**
 - > MOVILIZAR EQUIPO INSTRUMENTOS
 - > RECIRCULAR FLUIDO
 - > UTILIZAR CALENTAMIENTO POR TURBINA

FALLA VALVULA LEVE



- **PROBLEMA:**
 - > FUGA LEVE DE ACEITE HIDRAULICO
- **SOLUCION:**
 - > COMPENSAR ACEITE HIDRAULICO
 - > FORZAR VALVULA HASTA COMPENSAR